



Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 28/2026

# Navetan biokaasulaitoksesta lannoiterakeita?

Mädätysjäännöksen kuivauksen ja pelletöinnin nykytilanne  
teknistaloudellisesta ja ravinteiden kierrätyksen näkökulmasta

**Ari-Matti Seppänen, Kyösti Ruuttunen ja Ville Pyykkönen**

# **Navetan biokaasulaitoksesta lannoiterakeita?**

Mädätysjäännöksen kuivauksen ja pelletöinnin nykytilanne  
teknistaloudellisesta ja ravinteiden kierrätyksen näkökulmasta

**Ari-Matti Seppänen, Kyösti Ruuttunen ja Ville Pyykkönen**

**Viittausohje:**

Seppänen, A.-M., Ruuttunen, K. & Pyykkönen, V. 2026. Navetan biokaasulaitoksesta lannoite-rakeita? Mädätysjäännöksen kuivauksen ja pelletöinnin nykytilanne teknistaloudellisesta ja ravinteiden kierrätyksen näkökulmasta. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 28/2026. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 32 s.



ISBN 978-952-419-178-4 (Verkkajulkaisu)

ISSN 2342-7639 (Verkkajulkaisu)

URN <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-419-178-4>

Copyright: Luonnonvarakeskus (Luke)

Kirjoittajat: Ari-Matti Seppänen, Kyösti Ruuttunen ja Ville Pyykkönen

Julkaisija ja kustantaja: Luonnonvarakeskus (Luke), Helsinki 2026

Julkaisuvuosi: 2026

Kannen kuva: Ari-Matti Seppänen

## Tiivistelmä

Ari-Matti Seppänen<sup>1</sup>, Kyösti Ruuttunen<sup>1</sup> ja Ville Pyykkönen<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Luonnonvarakeskus (Luke), Helsinki

<sup>2</sup> Luonnonvarakeskus (Luke), Jyväskylä

Tässä raportissa tarkastellaan lypsykarjanavetan yhteydessä toimivan biokaasulaitoksen mädätteen jatkojalostamista lannoitepelleteiksi. Erityisesti keskitytään ruuvipuristimella tuotetun kuivajakeen kuivaamiseen pelletöinnin edellyttämään alhaiseen kosteuspitoisuuteen

Raportin kirjallisuuskatsauksessa esitellään kuivajakeen kuivaamiseen soveltuvia erilaisia kuivausteknologioita. Lisäksi osiossa mallinnetaan kirjallisuustietoon pohjaten lypsykarjatilän biokaasulaitoksen materiaali- ja energiatase tilanteessa, jossa kuivajake jalostetaan lannoitepelleteiksi.

Kirjallisuustiedon rinnalla raportissa esitellään Farmgas PS-3 -hankkeessa toteutettujen pilotmittakaavan kuivauskokeiden tuloksia. Koemateriaaleina käytettiin Luken tutkimusnavetoiden yhteydessä toimivien biokaasulaitosten mädätteitä. Kokeiden kautta tuotettiin tietoa prosessien energiankulutuksesta ja soveltuvuudesta kyseiselle materiaalille. Kokeissa kuivatuista materiaaleista tuotettiin lannoitepellettejä Luke Jokioisten Biopajalla.

Koemateriaaleista analysoitujen ravinnetulosten perusteella osana raporttia arvioitiin mädätteestä jatkojalostettujen jakeiden potentiaalia korvata prosessoimattoman mädätteen, kananlantapohjaisen luomulannoitteen sekä mineraalilannoitteen käyttöä yleisimmillä viljelykasveilla. Lannoituslaskelmien lisäksi jatkojalostuksen vaikutuksia paikalliseen ravinteidenkierrätykseen arvioitiin kirjallisuustiedon pohjalta.

Navetan yhteydessä toimivan biokaasulaitoksen mädätysjäännöksen jatkojalostaminen onnistuu teknisesti usealla eri kuivausteknologialla. Erilaisilla kuivausteknologioilla on kuitenkin vaikutuksia lopputuotteen ravinnepitoisuuteen sekä prosessointikustannuksiin. Kuivaukseen tarvittava huomattava energiamäärä huonontaa biokaasulaitoksen energiatasetta ja tarkastelussa mittakaavassa se kuluttaisin valtaosan biokaasulaitoksen energiantuotannosta. Kuivajakeesta tuotettu pelletti soveltuu osaksi alueen maatalojen lannoiterepertuaaria, mutta sillä ei voida suoraan korvata mineraalilannoitteiden käyttöä. Luomuviljelyssä lannoitepelletti ja ruuviseparoitu nestejake olivat kilpailukykyisiä vaihtoehtoja kaupalliselle luomulannoitteelle.

Kokonaisuudessaan suurimman haasteen pellettilannoitteen paikalliselle loppukäytölle asettaa tuotteen alhainen typpi-fosforisuhde, joka rajoittaa levitystä etenkin korkeamman fosforiluokan pelloilla. Toisaalta juuri pelletöinti mahdollistaa tuotteelle paremman kuljetettavuuden alueille, joissa fosforista on puutetta. Jos mineraalilannoitteiden hinnat jatkavat kasvamistaan pitkällä aikavälillä myös mädätteen pelletöinti nousee varteenotettavammaksi vaihtoehdoksi vahvistaa suomalaisen ruoantuotannon ravinneomavaraisuutta.

**Asiasanat:** lietelanta, biokaasu, mädätysjäännös, kuivausteknologiat, pelletöinti, tuotantokustannukset, levityskustannukset, ravinteiden kierrätys.

# Sisällys

<b>1. Johdanto .....</b>	<b>5</b>
<b>2. Mädätysjäännös ja biokaasuprosessi.....</b>	<b>6</b>
<b>3. Kuivausteknologiat.....</b>	<b>7</b>
3.1. Konvektiokuivaus.....	7
3.2. Konduktiokuivaus .....	8
3.3. Säteilysin perustuvat kuivausmenetelmät.....	8
3.4. Muut menetelmät.....	9
3.5. Mädätteen kuivaussovelluksia Suomessa ja maailmalla.....	9
<b>4. Mädätteen separointi ja kuivajakeen kuivaaminen: materiaali- ja energiataseet .....</b>	<b>11</b>
4.1. Prosessin rajaus, menetelmä ja lähtötiedot.....	11
4.2. Tulokset .....	13
4.3. Johtopäätökset .....	15
<b>5. Kuivauspilotoinnit lietalantapohjaisen mädätysjäännöksen kuivajakeilla ....</b>	<b>16</b>
5.1. Käytetyt menetelmät.....	16
5.1.1. Biopaja – Infrapunakuivaus .....	16
5.1.2. TM Systems Oy – Leijupetikuivaus.....	17
5.1.3. Ecomation Oy – Vakuumikuivaus .....	18
5.1.4. Pelletöintikokeet Biopajalla.....	18
5.1.5. Näytteenotot ja analyysit.....	19
5.2. Kuivauspilotointien tulokset.....	19
5.2.1. Lopputuotteen kuivuus ja prosessien energiankulutus.....	19
5.2.2. Kuivattujen jakeiden pelletöitävyys .....	21
5.2.3. Lopputuotteen ravinnepitoisuus.....	23
<b>6. Lannoitepelletin tuotannon ja käytön kustannukset ja vaikutukset paikalliseen ravinteiden kierrätykseen.....</b>	<b>24</b>
6.1. Prosessoinnin kustannukset .....	24
6.2. Levityskustannusten vertailu .....	25
6.2.1. Menetelmä.....	25
6.2.2. Tulokset.....	26
6.3. Tuotettujen ravinteiden paikallinen kierrättäminen ja lannoitusomavaraisuuden aste .....	28
6.4. Johtopäätökset .....	29
<b>Viitteet.....</b>	<b>30</b>

# 1. Johdanto

Mädätysjäännös eli mädäte on biokaasureaktorin anaerobisesta mädätysprosessista jäljelle jäävät liete, joka sisältää kasveille käyttökelpoisia ravinteita ja maaperää parantavaa hiiltä. Usein mädätteen ravinnepitoisuudet eivät kuitenkaan vastaa viljelykasvin lannoitetarpeisiin ja mädätteen korkea kosteuspuiteisuus lisää lannoitustyön kustannuksia ja työmääriä. Mädätteen jatkojalostuksella kuivajakeeksi ja siitä pelleteiksi pystytään näitä ravinteita jakamaan käyttökelpoisimmiksi tuotteiksi ja keventämään levitystyötä.

Tässä selvityksessä keskitytään erityisesti naudan lietelantapohjaiseen mädätteeseen ja siitä separoidun kuivajakeen prosessointiin. Kirjallisuudesta etsittiin teknologioita, jotka ovat sovellettavissa myös naudan lietelannalle ja kirjallisuuskatsauksen perusteella arvioitiin, kuinka relevanttia tietoa mädätteen jatkojalostamisesta on nykyisellään saatavilla. Kirjallisuuden pohjalta laadittiin materiaali- ja energiatase maatilamittakaavan biokaasulaitokselle ja siellä tapahtuvalle mädätteen jatkojalostukselle.

Kirjallisuudesta kerätyn tiedon pohjalta ja sen tueksi valittiin kaksi suomalaista teknologiaa pilottimittakaavan kuivauskokeiden toteuttamiseksi. Näiden rinnalla Luke toteutti kuivaus- ja pelletointikokeita Jokioisten Biopajalla. Kokonaisuudessaan tietoa kerättiin kolmesta eri kuivausteknologiasta ja niiden lopputuotteiden ravinnepitoisuudesta sekä pelletoitävyydestä.

Kaiken kerätyn tiedon pohjalta luotiin vertailu pääviljelykasvien lannoittamisesta mädätteestä jalostetuilla jakeilla, jolloin mahdolliset hyödyt viljelijälle konkretisoituvat. Tämän lisäksi tarkasteltiin vaikutuksia paikalliseen ravinteiden kiertoon.

## 2. Mädätysjäännös ja biokaasuprosessi

Biokaasua tuotetaan anaerobisella reaktorilla. Prosessin raaka-aineena, eli syötteenä, voivat olla monenlaiset kotitalouksien, maatalouden, teollisuuden tai jätevesipuhdistamoiden sivu- ja jätevirrat, kuten karjanlanta, puhdistamoliete ja kotitalouksien biojäte. Tässä kirjallisuuskatsauksessa ei kuvailla biokaasun tuotantoa yksityiskohtaisesti: perustietoa löytyy esimerkiksi Hämeen ammattikorkeakoulun julkaisemasta kirjasta.<sup>1</sup>

Biokaasuprosessin aikana raaka-ainelietteestä muodostuu mikrobien toiminnan vaikutuksesta biokaasua, joka erotetaan lietteestä reaktorissa. Ennen puhdistamista biokaasu sisältää metaanin lisäksi pääasiassa hiilidioksidia, pieniä määriä haihtuvia rikki- ja typpiyhdisteitä sekä joissakin tapauksissa myös typpikaasua. Epäpuhtaudet poistetaan metaanin seasta ennen sen jalostamista liikennepolttoaineeksi tai sen polttamista lämmöksi ja sähköksi ns. CHP-laitoksella (engl. *combined heat and power*).<sup>1</sup> Reaktorin syötteen kuiva-ainepitoisuus (ka-%) on tyypillisesti varsin alhainen ja se pienenee prosessin edetessä mikrobiologisista reaktioista johtuen: esimerkiksi sian lietelannan ka-% aleni prosessin aikana 4–5 %-yksikköä (alkuperäinen syötteen ka 9–12 % vs. mädätteen 5–7 %).<sup>2</sup>

Biokaasuprosessin edetessä syntyvän kaasun lisäksi myös raaka-ainelietteen ominaisuudet muuttuvat. Reagoimutta lietettä, joka poistetaan reaktorista prosessin lopuksi, kutsutaan mädätysjäännökseksi eli mädätteeksi. Biokaasun muodostuessa lietteen happamuus pienenee, eli mädätteen pH on korkeampi kuin syötteen. Samalla osa ravinteista, kuten esimerkiksi typpiyhdisteet, muuttuvat liukoisempaan muotoon. Mädäte on myös fyysisiltä ominaisuuksiltaan homogeenisempaa kuin syöte. Nämä muutokset tekevät mädätelietteestä helpommin levitettävää ja ravinneominaisuuksiltaan parempaa lannoitetta kuin esimerkiksi raaka-aineena tyypillisesti käytettävä lietelanta.<sup>1</sup>

Pienissä, esimerkiksi maatilamittakaavan biokaasulaitoksissa (syötteen määrä tuhansia tonneja vuodessa),<sup>3</sup> mädäte on useimmiten järkevintä levittää sellaisenaan lannoitteeksi pellolle. Suurissa, teollisen mittakaavan laitoksissa, joissa syötteen määrä on esim. 100 000 t/a,<sup>2</sup> mädätteen jatkojalostaminen voi olla kannattava vaihtoehto. Jatkojalostamisella tarkoitetaan yleensä kierrätyslannoitteiden valmistusta. Yleensä mädätteen jalostuksen ensimmäinen ja usein myös ainoa vaihe on mekaaninen separointi suodattamalla (esim. ruuvipuristimella) tai linkoamalla. Separointi tuottaa kuivajaetta (kiintojaetta) ja nestejaetta. Karkeasti voidaan sanoa, että nestejäte sisältää kasviravinteista erityisesti liukoisen typen yhdisteitä, kun taas fosfori rikastuu kuivajakeeseen.<sup>1</sup>

### 3. Kuivausteknologiat

Kuten edellä kuvattiin, mädätteen kuivaus alkaa nestejakeen mekaanisella erottamisella kuivajakeesta, mitä kutsutaan myös separoinniksi. Erottumista voidaan tehostaa lisäämällä kuiva-ainetta sitovaa polymeeriä.<sup>1</sup> Kuivajakeen separointi tehdään mekaanisesti suodattamalla tai linkoamalla. Syntyneen kuivajakeen ka-% vaihtelee mädätteen ominaisuuksien ja käytetyn separointimenetelmän mukaan, mutta voidaan arvioida, että ka-% on separoinnin jälkeen 18–35 %.<sup>4</sup>

Mekaanisen vedenerotuksen jälkeen mädätettä kuivataan vettä haihduttamalla, mikä yleisimmin tapahtuu lämmittämällä. Kun haihdutetaan yksi kilogramma vettä normaalipaineessa (1,013 MPa), energiaa kuluu 2 260 kJ<sup>5</sup> (0,628 kWh). Tämä on luonnon antama raja-arvo, jota alemmas ei haihdutuksen energiankulutuksessa voi päästä. Laittevalmistajien<sup>6–8</sup> ilmoitusten mukaan erilaiset haihduttamiseen perustuvat kuivauslaitteet kuluttavatkin tyypillisesti energiaa 0,7–1,1 MWh tonnia haihdutettua vettä kohti (0,7–1,1 kWh/kg).

Kuiva-ainepitoisuus vaikuttaa siihen, kuinka hyvin kuivaus etenee ja kuinka helppoa mädätettä on käsitellä. Katsausartikkelissaan Chen ym. (2002)<sup>9</sup> kuvaavat puhdistamolietteen kuivausta kolmivaiheisena prosessina siten, että matalassa kuiva-ainepitoisuudessa lietettä on helppo käsitellä, koska se levittyy vaivatta eikä takerru laitteistojen pinnoille. Kun lietteen ka-% on tasolla 55–70 %, sen ominaisuudet muuttuvat ja liete alkaa takertua kuivaimen pinnoille, mikä vaikeuttaa kuivaamista. Tätä pyritään hillitsemään sekoittamalla kosteaan lietteeseen jo kuivattua lietettä: yli 70 %:n kuiva-ainepitoisuudessa liete muuttuu rakeisemmaksi eikä tarttuvuus ole enää suuri ongelma. Kuivan lietteen lisäksi kuivausta voidaan edistää lisäämällä lietteen sekaan myös muita materiaaleja, kuten sahanpurua<sup>10–12</sup>, olkea<sup>11–13</sup> tai muita viljan korjuutähteitä<sup>11,12</sup>.

Vaikka Chen ym.<sup>9</sup> käsittelevät artikkelissaan puhdistamolietteen kuivausta, myös mädätteen kuivauksessa käytetään vastaavaa sekoitustekniikkaa, kuten raportoidaan melko äskettäin ilmestyneessä mädätteen kuivajakeen kuivausteknologioita käsittelevässä katsausartikkelissa (Salamat ym. 2022).<sup>14</sup> Alla esitetään yhteenveto kuivausteknologioista pääosin tähän artikkeliin sekä siinä käytettyihin lähteisiin perustuen. Kuivausteknologiat esitellään erikseen kuivausilmiöön perustuen, mutta on hyvä muistaa, että teollisissa kuivausprosesseissa, kuten myös erillisissä kuivauslaitteissa, eri ilmiöihin perustuvia teknologioita voidaan yhdistellä halutun tuloksen saavuttamiseksi.

#### 3.1. Konvektiokuivaus

Konvektiokuivauksessa kosteus poistuu, kun lämmin ilma – tai muu kaasu – haihduttaa vettä kuivattavasta materiaalista. Konvektiokuivaukseen perustuvia menetelmiä voidaan kutsua suorakuivaukseksi (engl. *direct drying*), koska näissä menetelmissä lämmön lähde (lämmitetty kaasu) on suoraan kosketuksissa kuivattavan materiaalin kanssa. Tämän on hyvin yleinen teknologia ja paljon käytetyt rumpu- ja hihnakuivaimet ovat konvektiokuivaimia. Konvektiokuivauksen tehokkuutta, taloudellisuutta ja ympäristöystävällisyyttä voidaan parantaa käyttämällä kuivaukseen hukkalämpöä (esim. CHP-yksiköstä), kierrättämällä kuivausilmaa sekä maksimoimalla lämmölle altistuvan mädätteen pinta-ala. Kuivausilman kierrätyksen yhteydessä voidaan myös erottaa ja käsitellä kuivauksessa haihtuvat yhdisteet ja irronneet partikkelit.<sup>9,14</sup>

### 3.2. Konduktiokuivaus

Konduktiokuivauksessa kuivuminen tapahtuu lämmön johtumiseen seurauksena, kun kuivatava materiaali on kosketuksissa lämmitetyn pinnan kanssa. Tällaisia kuivaimia ovat esimerkiksi lautas-, ohutkalvo- ja melakuivurit (engl. *disc/tray, thin-film, ja paddle dryers*). Näitä menetelmiä voidaan kutsua myös epäsuoraksi kuivaamiseksi (engl. *indirect drying*), koska kuivauksessa lämpö johdetaan kuivattavaan materiaaliin lämmitetyn pinnan kautta.<sup>9</sup> Näissä kaikissa kuivureissa on siis luonnollisesti olennaista, että kuivattava liete on kosketuksissa lämmitettyä pintaa vasten. Tämä saadaan aikaa jatkuvalla sekoituksella ja materiaalin painamisella tai kuljettamisella kohti lämmitettyä pintaa, jolloin hyvä lämmönsiirto pinnan ja kuivattavan materiaalin välillä on olennaista. Haihtuneet yhdisteet ja irronneet partikkelit poistetaan vesihöyryn mukana kuivauskammioista alipaineen tai ilmavirran avulla.<sup>14</sup>

### 3.3. Säteilystä perustuvat kuivausmenetelmät

Auringon valon ja lämmön käyttäminen on yleisin säteilystä perustuva kuivausmenetelmä. Koska auringon säteily on ilmaista, siihen perustuvat menetelmät ovat taloudellisesti houkuttelevia. Aurinkokuivauksen on raportoitu myös olevan tehokas tapa vähentää kuivatun lietteen taudinaiheuttajien määrää.<sup>15</sup> Auringonvaloa voidaan käyttää suljetuissa tai avoimissa kasvihuoneissa. Hybridimalli voidaan toteuttaa niin, että auringonvalon lisäksi kuivauksen aikana lattiaa lämmitetään (esim. aurinkoenergialla). Aurinkokuivausta tehostetaan tuulettimilla, jotka tuovat kuivaa ilmaa kostean tilalle kuivauksen aikana. Samoin kuivattavaa materiaalia on syytä sekoittaa kuivauksen tehostamiseksi: kuivan pintakerroksen alla oleva kostea materiaali tulee saattaa kontaktiin säteilyn ja ilman kanssa.<sup>14</sup>

On sanomattakin selvää, että auringonvaloon perustuvien menetelmien tehokkuus riippuu sää- ja ilmasto-olosuhteista. Suotuisassa ilmastossa, kuten Kreikassa, tulokset ovat olleet lupaavia: pilottikoon kasvihuoneessa, jonka kapasiteetti oli 16,5 m<sup>3</sup> lietettä yhtä kuivauserää kohti, liete saatiin kuivattua 95 % kuiva-ainepitoisuuteen sääolosuhteista riippuen 8–31 päivässä.<sup>16</sup> Auringonsäteilystä perustuvia kuivauskokeita on tehty pilottikoossa myös Puolassa, jossa kuivausta tehostettiin infrapuna- eli IR-säteilyllä sekä lämmittämällä kasvihuoneen lattiaa. Näissä kokeissa sekä IR-lamppujen että lattialämmityksen energiankulutus havaittiin korkeaksi saatuun kuivaustehokkuuteen nähden, mikä heikensi menetelmän ympäristöystävällisyyttä ja taloudellisuutta.<sup>17</sup>

Mikroaaltosäteilyllä tapahtuva kuivaus on myös mahdollista. Menetelmän etuina on mainittu mahdollisuus korkeaan automaatiotasoon, nopea lämmitys, energiansäästö, materiaalin sisäosien lämmitys ja lämmitysprosessin helppo säätö. Myös bakteerien tuhoutuminen on tehokasta.<sup>14</sup>

Kuten jo yllä mainittiin, myös IR-säteilyä voidaan käyttää lietteen kuivaukseen. Ilmeisesti tämä ei kuitenkaan ole kovin yleistä. Aiemmin mainitun esimerkin<sup>17</sup> lisäksi käymälälietteen IR-kuivausta keski-infrapuna-alueella (MIR-säteily, aallonpituus 3–25 µm) on kuvattu eteläafrikkalaisessa artikkelissa.<sup>18</sup> Molemmissa tapauksissa IR-säteilyllä pystyttiin siirtämään lämpöenergiaa tehokkaasti ja nopeasti lietteeseen, mutta tämä johti materiaalin pintakerroksen lämpötilan nopeaan nousuun. Jotta kuivaus olisi mahdollisimman tehokasta tällaisissa olosuhteissa, lietettä pitäisi pystyä sekoittamaan nopeasti: näin pintakerroksen saisi pysymään koko ajan kosteana ja veden haihtumisen mahdollisimman korkealla tasolla. MIR-kuivaus johti pahimmillaan lietteen palamiseen.<sup>18</sup>

IR-kuivaukseen liittyen löytyy myös ainakin yksi patentoitu hihnakuivuri<sup>19</sup> ja ensimmäinen puhdistamoliikkeen kuivaukseen tarkoitettu laite on otettu käyttöön Suomessa Puumalan kunnallisella jätevedenpuhdistamolla 2018.<sup>24</sup>

Biotermiäinen kuivaus perustuu mikrobien aiheuttamaan orgaanisen aineksen aerobiseen hajoamiseen, mikä tuottaa lämpöä. Biotermisellä menetelmällä voidaan kuivata sekä biokaasuprosessin mädätteitä<sup>20</sup> että jäteliikkeitä<sup>21</sup>. Biotermiäinen kuivaus on aerobinen prosessi, ja koska se perustuu mikrobitoiminnan lisäksi ilmvirtaukseen, menetelmässä käytetään tavanomaisesti täyteainetta tai kuiviketta, joka tekee kuivattavasta lietteestä tai mädätteestä huokoista. Paremman ilmanläpäisevyyden lisäksi täyteaineen lisääminen tuo prosessiin lisää orgaanista ainesta, jota mikrobit käyttävät kasvuun ja sitä kautta lämmöntuotantoon; olki ja sahanpuru tai puuhake ovat yleisesti käytettyjä täyteaineita.<sup>12,21–23</sup>

Biotermiäinen kuivaus muistuttaa paljon kompostointia. Olennaisena erona näissä menetelmissä on kuitenkin, että kompostoinnilla pyritään muuttamaan syöte stabiiliksi mullaksi, kun taas biotermiäinen kuivaus tähtää siihen, että kosteus poistuu mahdollisimman tehokkaasti lämmön ja ilmvirran ansiosta. Biotermiäinen kuivaus on myös kestoltaan lyhyempi prosessi kuin kompostointi. Biotermiäisen kuivauksen tuote voidaan jatkojalostaa esimerkiksi kierrätyslannoitteeksi.<sup>20,22,23</sup>

Biotermiäisen kuivauksen yhteydessä mädätteen kemiallinen koostumus muuttuu. Koska koko menetelmä perustuu orgaanisen aineksen hajoamiseen, luonnollisesti mädätteen orgaaninen aines vähenee. Itse asiassa jo ennen biotermiäisen kuivauksen aloittamista on tärkeää varmistaa, että kuivattava määdte sisältää riittävästi orgaanista ainesta, jotta kuivaus onnistuu. Typpiyhdisteitä voi myös poistua mädätteestä: ammoniakkia voi haihtua suoraan poistuvien kaasujen ja kosteuden mukana. Typpiyhdisteet voivat myös hapettua prosessissa ja tämän prosessin tuloksena voi syntyä alkuainetyyppiä ja typpioksiduulia (N<sub>2</sub>O), joka on voimakas kasvihuonekaasu. Typpihäviötä voidaan hillitä kemiallisilla ja biologisilla menetelmillä.<sup>20</sup>

### 3.4. Muut menetelmät

Muita kirjallisuudessa mainittuja lietteen kuivausmenetelmiä ovat mm. konvektio- ja konduktiokuivausta yhdistävä leijupetikuivaus, josta on esimerkkejä kahdessa katsausartikkelissa.<sup>9,14</sup> Samoissa artikkeleissa mainitaan myös mm. kuivaus upottamalla kuumaan öljyyn (engl. *fry-drying*), katalyyttinen aurinkokuivaus, osmoottinen kuivaus sekä kuivaus tulistetulla höyryllä.

### 3.5. Mädätteen kuivaussovelluksia Suomessa ja maailmalla

Lakeuden etappi Oy valmistaa Etelä-Pohjanmaalla Ranu-maanparannusraetta kuivaamalla ja pelletöimällä biokaasulaitoksen mädätettä sekä jätevedenpuhdistamon lietettä.<sup>25</sup> Mädätteen kuivajae erotetaan linkokuivauksella. Rejektivesi palautetaan puhdistamolle, kuivajae puolestaan kuivataan termisesti Haarslev Industries kiekkuivurilla. Varsinais-Suomalainen Fertilex tuottaa lannoitepellettituotteita paikallisen kananmunan tuotannon lannoista.<sup>26</sup> Munakana- loiden lannankäsittelyyn investoidut Dorset GM lauhdeilmakuivurit kuivaavat jatkuvatoimisesti kerättyä lantaa puhaltamalla kanalan 20–25 asteista poistoilmaa lantapedin lävitse. Kuivattu lanta kuljetetaan Fertilexin lannoitetehtaalalle, jossa se pelletöidään ja hygienisoidaan eriseoksina luomu- ja organomineraaliksi tuotteiksi. Myös varsinaissuomalainen Biokasvu Oy

valmistaa orgaanisia lannoitteita.<sup>27</sup> Biokasvu Oy käyttää rumpukuivausta valmistusprosessissaan.

DTS Finland on kehittänyt oman mikrotermisen menetelmänsä mädätteen kuivaukseen.<sup>28</sup> Kyseisellä menetelmällä turkulainen Gaiamare Oy<sup>29</sup> pyrkii kehittämään kaupallisen kierrätyslannoitteen.<sup>30</sup> Salossa ja Savonlinnassa sijaitseva Ecomation Oy puolestaan kertoo sivuillaan,<sup>31</sup> että sen vakuumikuivaus- ja kuivatislausmenetelmällä biolietteestä voidaan valmistaa turvallisia lannoitteita ja muita arvokkaita tuotteita. Oululainen SFTec<sup>32</sup> taas pyrkii tuottamaan lisäarvoa kuivaamalla erilaisia orgaanisia sivuvirtoja, kuten lietteitä. Kuivausteknologiana on lähinnä hihna-kuivuri. SFTec hyödyntää myös teollisuuden hukkalämpöä kuivausratkaisuissaan. Turussa toimiva TM Systems<sup>33</sup> on kehittänyt ilman virtaukseen perustuvan leijupetikuivurin, jota voidaan valmistajan mukaan soveltaa myös mädätteen kuivaukseen. Kuivaamisen yhteydessä on myös mahdollista ottaa talteen osa kuivauslämmöstä.

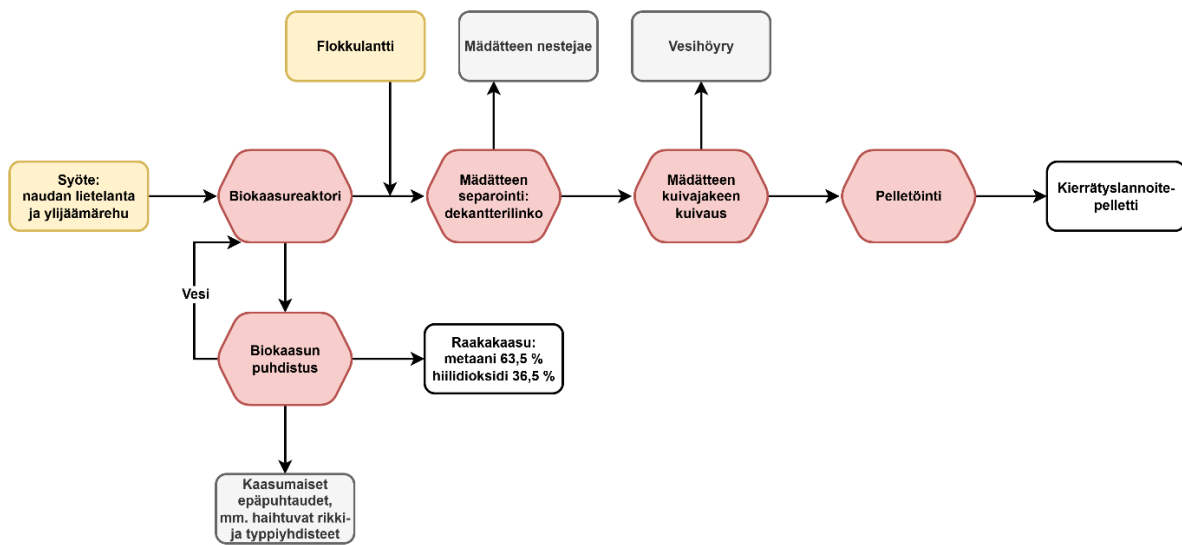


**Kuva 1.** Fertilexin lannoitetehtaalla lannoitekomponentit sekoitetaan panostoimisessa sekoittajassa ennen pelletointiä.

## 4. Mädätteen separointi ja kuivajakeen kuivaamisen: materiaali- ja energiataseet

### 4.1. Prosessin rajaus, menetelmä ja lähtötiedot

Alla on kuvattuna biokaasuprosessi (Kuva 2). Kaavion pohjalta on laskettu esimerkki prosessin energiataseesta. Laskentaesimerkki pohjautuu aiemmin julkaistuun tietoon<sup>35</sup> ja laskennassa on käytetty apuna myös Luken Biokaasulaskuria.<sup>36</sup>



**Kuva 2.** Biokaasuprosessin vuokaavio. Syötteen määrä on 10 000 t/a ja se sisältää 90 % naudan lietalantaa ja 10 % säilörehua.

Laskentaesimerkinä on maatilamittakaavan biokaasulaitos, jonka kokonaissyöttemäärä on 10 000 t/a. Syötteen kokonaismäärästä 90 % on naudan lietalantaa ja 10 % ylijäämärehua. Reaktori on mesofiilinen märkäreaktori ja mädäte separoidaan dekanterilingolla. Määdäte kuivataan termisesti 90 %:n kuiva-ainepitoisuuteen, minkä jälkeen siitä valmistetaan kierrätyslannoitepellettejä. Biokaasusta poistetaan kosteus ja kaasumaiset epäpuhtaudet (pelkistyneet haihtuvat rikki- ja typpiyhdisteet), jolloin tuotteeksi saadaan puhdistettua raakakaasua, sisältäen n. 63,5 til.% metaania (CH<sub>4</sub>) ja 36,5 til.% hiilidioksidia (CO<sub>2</sub>). Tässä esimerkissä ei oteta kantaa siihen, miten raakakaasu jatkojalostetaan, vaan raakakaasulle lasketaan vain teoreettinen kokonaisenergiasisältö. Laskennassa käytetyt lähtötiedot on lueteltu alla (Taulukko 1).

**Taulukko 1.** Laskennan lähtötiedot maatilamittakaavan biokaasuprosessille, jossa mädäte separoidaan dekantterilingolla ja mädätteen kuivajae kuivataan hihnakuivurilla. Nm<sup>3</sup>=normaali-kuutiometri (kaasun laskennallinen tilavuus normaalissa ilmanpaineessa ja 0 °C:ssa)

	Määrä	Yksikkö
Syötteen kokonaismäärä <sup>a</sup>	10 000	t/a
Käyttöpäiviä vuodessa <sup>b</sup>	350	d/a
Käyttötunteja vuodessa	8 400	h/a
Syötteen kokonaismäärä päivässä	29	t/d
Syötteen kokonaismäärä tunnissa	1 190	kg/h
Hydraulinen viipymäaika (HRT)	50	d
Reaktorin laskennallinen tilavuus	1 429	m <sup>3</sup>
Syötteen kuiva-ainepitoisuus (TS)	11	p. %
Syötteen orgaanisen kuiva-aineen pit. (VS)	83	p. % TS
VS:n alenema biokaasureaktorissa	45	p. %-yksikköä
Mädätteen TS biokaasureaktorissa	7,7	p. %
Metaanin tuotantopotentiaali (BMP)	244	Nm <sup>3</sup> /t VS
Metaanin tuottopotentiaalın toteuma <sup>c</sup>	86	p. %
Biokaasun metaanipitoisuus	63,5	til. %
Mädätteen kuivajakeen TS	25	p. %
Mädätteen kuivatun kuivajakeen TS	90	p. %
Mädätteen nestejakeen TS	2,3	p. %
Flokkulantın määrä separoinnissa	4	kg/tTS
ρ(metaani)	0,72	kg/Nm <sup>3</sup>
ρ(hiilidioksidi)	1,96	kg/Nm <sup>3</sup>
Metaanin energiasisältö <sup>c</sup>	10	kWh/Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub>
Veden ominaislämpökapasiteetti	1,16	kWh/t°C

<sup>a</sup>)Syöte sisältää 90 % naudan lietelantaa ja 10 % säilörehua

<sup>b</sup>)Reaktorin käytössä on vuodessa noin kahden viikon (15 d) huoltoseisokki

<sup>c</sup>)Ks. esim. Luken Biokaasulaskuri<sup>35</sup>

## 4.2. Tulokset

Taulukko 2 näyttää tuotetun biokaasun määrän. Samassa taulukossa näkyy myös metaanin tuottopotentiaalinen toteuma, joka on 86 % teoreettisesta saannosta. Luku tarkoittaa sitä, että laskennallisesta tuottopotentiaalista jää 14 % saavuttamatta, eli se menetetään joko mädätteen jäävänä reagoimattomana orgaanisena aineena tai vuotoina ympäristöön. Alla olevassa taulukossa ilmoitetaan myös laskettu mädätteen määrä ja sen kuiva-aineen ja orgaanisen aineksen määrät, ja myös samat tiedot separoituista neste- ja kuivajakeista. Separointiin käytetään tässä prosessissa dekantterilinkoa.

**Taulukko 2.** Biokaasuprosessin, separoinnin, kuivauksen ja pelletöinnin materiaalitase. Separointiin käytetään dekantterilinkoa ja kuivaukseen hihnakuivuria. TS=kokonaiskuiva-aine (total solids), VS=orgaaninen kuiva-aine (volatile solids).

	Määrä	Yksikkö
<b>Tuotettu biokaasu</b>		
Metaani (CH <sub>4</sub> )	192 726   139	Nm <sup>3</sup> /a   t/a
Hiilidioksidi (CO <sub>2</sub> )	110 639   217	Nm <sup>3</sup> /a   t/a
<b>Mädäte</b>		
Kuiva-aine	697	t/a
Orgaaninen aines	505	t/a
H <sub>2</sub> O	8 947	t/a
Kokonaismäärä	9 644	t/a
<b>Separoitu kuivajae</b>		
TS	528	t/a
VS	381	t/a
H <sub>2</sub> O	1 583	t/a
Kokonaismäärä	2 111	t/a
<b>Separoitu nestejae</b>		
TS	172	t/a
VS	124	t/a
H <sub>2</sub> O	7 364	t/a
Kokonaismäärä	7 536	t/a
<b>Kuivattu kuivajae ja siitä tuotettu pelletti</b>		
TS	528	t/a
VS	381	t/a
H <sub>2</sub> O	59	t/a
Kokonaismäärä	586	t/a

Biokaasuprosessin energiataseen laskentaan käytetyt oletusarvot sekä laskennan tulokset on esitetty alla (Taulukko 3).

**Taulukko 3.** Biokaasuprosessin energiankulutus osaprosesseittain sekä tuotetun biokaasun energiasisältö. N/A tarkoittaa, että tietoa ei ole saatavilla.

	Energiankulutus prosessivaiheittain			
	kWh/t	MWh/a	kWh/h	Osuus
3. Mädatteen separointi (dekanterilinko)	3 <sup>a)</sup>	29	3	1,8 %
4. Mädatteen kuivajakeen kuivaus (hihnakuivain)	838 <sup>b)</sup>	1 277	152	73,7 %
2. Reaktorin sekoitus (lapasekoitin)	4 <sup>c)</sup>	36	4	2,1 %
1. Reaktorin lämmitys	32 <sup>d)</sup>	325	39	18,8 %
6. Prosessin muu energiantarve	N/A	33 <sup>f)</sup>	3 <sup>f)</sup>	1,9 %
5. Kuivatun jakeen pelletöinti	60 <sup>e)</sup>	35	30	2,0 %
Kokonaismäärä	N/A	1 735	202	100,0 %
	Biokaasun tuotanto ja energiasisältö			
	Nm <sup>3</sup> /a	kWh/Nm <sup>3</sup>	MWh/a	kWh/h
Tuotettu metaani	192 726	10	1 927	229
	Energiankulutus kWh/t			
Kuivausenergian tarve tonnille mädatettä <sup>g)</sup>			135	
Kokonaisenergian tarve tonnille mädatettä <sup>h)</sup>			180	

<sup>a)</sup>Sähkönkulutus separoitavaa mädatetonna kohti<sup>34</sup>

<sup>b)</sup>Energiankulutus haihdutettua vesitonna kohti (sisältäen tarvittavan lämmön ja sähkön)<sup>33</sup>

<sup>c)</sup>Tarvittava sekoitusteho 3 W/m<sup>3</sup> reaktorilietettä<sup>34</sup>

<sup>d)</sup>Arvioitu, että syöte lämmitetään 12 °C:sta 40 °C:een, ominaislämpökapasiteetti sama kuin vedellä<sup>33</sup>

<sup>e)</sup>Pelletöinnin energian kulutus kirjallisuuden perusteella (Novak ym. 2024)<sup>35</sup>

<sup>f)</sup>Kirjoittajan arvio energiankulutuksesta (2 % nimettyjen laitteiden energiankulutuksesta)

<sup>g)</sup>Mädatteen separoinnin ja termisen kuivauksen energiankulutus jaettuna tuoreen mädatteen kokonaismäärällä

<sup>h)</sup>Koko prosessin energiankulutus jaettuna tuoreen mädatteen kokonaismäärällä

Esitetyn energiataseen perusteella biokaasulaitoksen vuosittain tarvitsema kokonaisenergiämäärä on 1 735 MWh, jos prosessi sisältää mädatteen kuivajakeen kuivaamisen termisesti hihnakuivurilla. Mädatteen separointi ja kuivajakeen kuivaaminen kattavat kokonaisenergiatarpeesta yli 75 % (1 295 MWh/a). Metaanin vuosituotannon kokonaisenergisäisältö on puolestaan 1 927 MWh, joten metaaniin sitoutunutta ylijäämäenergiaa sähkön- ja lämmöntuotantoon tai myytäväksi jäisi 208 MWh/a. Tässä yhteydessä on syytä huomata, että metaanille laskettu energiasisältö on teoreettinen luku. Todellisuudessa metaanista ei saada tuotettua tuota määrää energiaa, koska energiantuotannossa tapahtuu aina häviöitä.

Yllä oleva energiatasetarkastelu osoittaa, että mädatteen kuivajakeen terminen kuivaus kuluttaa huomattavan määrän energiaa. Tarkastelun perusteella maatilamittakaavan biokaasulaitoksessa 88 % tuotetun metaanin kokonaisenergisäisällöstä tarvittaisiin prosessin käynnissä pitämiseen, jos kaikki mädate haluttaisiin separoida ja sen kuivajae kuivata esimerkiksi kierrätyslannoitepellettien valmistusta varten.

Mädatettä ei tietenkään ole pakko kuivata kokonaisuudessaan, vaan siitä voidaan jalostaa vain osa lannoitepelleteiksi. Esitettyjen energia- ja materiaalitaseiden avulla voidaan laskea, että kuivausenergian tarve yhdelle biokaasureaktorista tulevalle tuorelle mädatetonnille on 135 kWh (ks. Taulukko 3). Jos arvioidaan, että kaikki dekanterilingon tarvitsema energia on

sähköenergiaa ja että kuivaimen energiankulutuksesta 4,68 % on sähköenergiaa<sup>34</sup>, saadaan tulokseksi, että yhtä tuoretta mädätetöntä kohti tarvitaan 126 kWh lämpöenergiaa ja 8,9 kWh sähköenergiaa, kun mädätteen kuivajae kuivataan 90 %:n ka-pitoisuuteen. Pelletöinnin osuus kokonaisenergiankulutuksesta on hyvin pieni, vain 2,0 %.

### 4.3. Johtopäätökset

Biokaasureaktorista saatava mädäte sisältää paljon kosteutta (ka-% on alle 10 %), minkä vuoksi sen kuivaukseen tarvitaan paljon energiaa. Mädätteestä voidaan poistaa suuri määrä nestettä suhteellisen energiatehokkaasti mekaanisilla menetelmillä, esimerkiksi linkoamalla, mutta tämänkin jälkeen kuivajakeen ka-% on maksimissaan 35 %. Jos kuivajakeesta halutaan jalostaa esimerkiksi lannoiterakeita pelletöimällä, tulisi tuote saada kuivatuksi n. 90 %:n kuivaainepitoisuuteen.

Mekaanisen vedenpoiston jälkeen kuivajakeen jatko kuivaus perustuu veden haihduttamiseen lämpöenergialla. Tarvittava energia saadaan siirtymään kuivattavaan materiaaliin, joko konvektion, konduktion tai säteilyn avulla. Kirjallisuuden perusteella konvektio- ja konduktio-kuivaus sekä niiden yhdistelmät ovat tällä hetkellä käytetyimpiä kuivajakeen kuivausmenetelmiä. Haihduttamiseen tarvittavan lämpöenergian määrää voidaan pienentää vakuumia hyödyntämällä: alennettu paine laskee veden kiehumispistettä, mutta toisaalta myös vakuumin muodostaminen kuluttaa energiaa. Säteilyn hyödyntämismenetelmänä potentiaalisin lienee aurinkokuivaus, mutta Suomen olosuhteissa auringon energian hyödyntäminen ei varsinkaan talvella ole realistista. IR-säteilyyn perustuvaa kuivausta käytetään sekä teollisuudessa että pilottilaitteissa (mm. Jokioisten Biopajassa), mutta siinä ongelmana on liallinen kuumeneminen, joka voi johtaa kuivattavan mädätteen pintaosien palamiseen.

Tarvittavaa haihdutuslämpöä voidaan tuottaa myös mikrobien avulla. Tähän periaatteeseen perustuu mikroterminen kuivaus. Mädätteen tapauksessa tämän menetelmän rajoitteena voi olla mädätteen sisältämän orgaanisen aineksen pieni määrä, koska syötteen orgaaninen aines hajoaa merkittävästi jo biokaasureaktorissa. Mikroterminen kuivaus on aerobinen menetelmä, minkä vuoksi mädätteen kemiallinen rakenne muuttuu ja tämä voi johtaa esimerkiksi typpiyhdisteiden haihtumishäviöön.

Raportissa esitetyn tasetarkastelun perusteella maatilamittakaavan laitoksessa (syötteen määrä 10 000 t/a) mädätteen separointi ja kuivajakeen kuivaus lisäisi biokaasuprosessin energiankulutusta merkittävästi: 88 % tuotetun metaanin energiasta kuluisi prosessin käynnissä pitämiseen. Sähköntarve mädätteen kuivauksessa on vähäistä: esitetyn energiataseen mukaan vedenpoiston ja termisen kuivauksen kokonaisenergiatarpeesta vain 6,6 % on sähköenergiaa.

Mädätteen kuivajakeen jatkojalostus voidaan saada kannattavammaksi, jos kuivaukseen olisi saatavilla edullista lisäenergiaa. Tässä kontekstissa olisikin hyödyllistä tutkia, voitaisiinko muitakin kuin oman CHP-laitoksen hukkalämpöä hyödyntää kierrätyslannoitevalmisteiden valmistuksessa. Hukkalämpöä on saatavilla monista teollisista prosesseista sekä esim. datakeskusten jäähdytyksestä. Soveltamalla teollista symbioosia olisi mahdollista luoda prosessiyhdistelmiä, jotka keventävät sekä kuivauksen kustannuksia että parantavat laitoksen kokonaistaloutta.

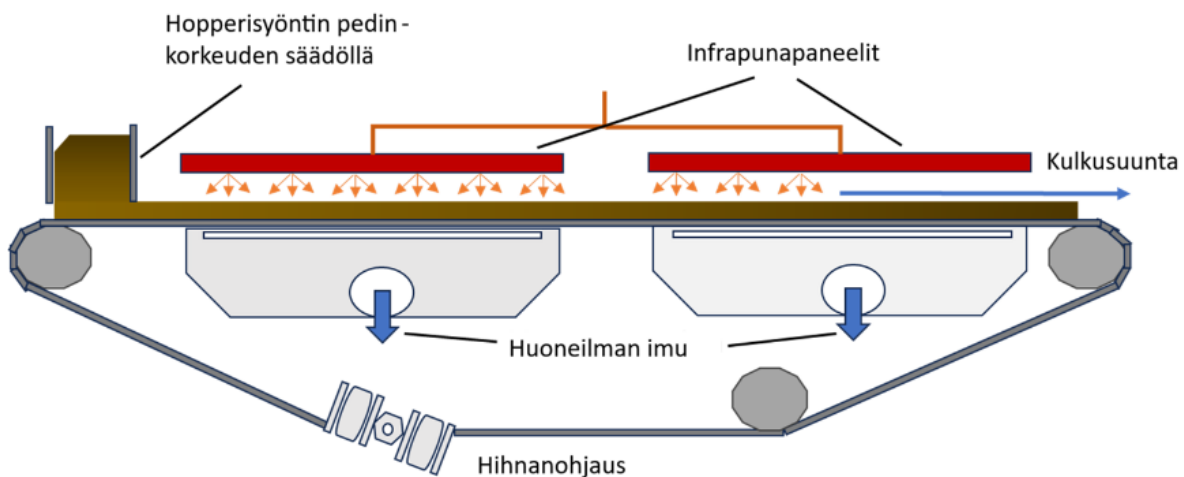
## 5. Kuivauspilotoinnit lietelantapohjaisen mädätysjäännöksen kuivajakeilla

### 5.1. Käytetyt menetelmät

Kevään ja kesän 2025 aikana toteutettiin kolmen kuivausteknologian pilot-kokeet Farmgas-PS 3 -hankkeen toimesta. Kokeiden raaka-aineena käytettiin Luken navetoiden (Maaninka ja Jokioinen) biokaasulaitosten mädätysjäännöksiä, jotka separoitiin neste- ja kuivajakeeksi saatavilla olevilla teknologioilla. Kaksi pilotointia toteutettiin ulkoisten palveluntarjoajien toimesta ja yksi Luken Biopajan omalla laitteistolla. Kuivauksen tavoitteeksi asetettiin saavuttaa pelletöinnin edellyttämä yli 85 % kuiva-ainepitoisuus. Vertailukohtina selvitettiin myös eri teknologioiden energiankulutusta ja lopputuotteen ravinnepitoisuutta. Kuivatuista jakeista toteutettiin pelletöintiajot Biopajan Kahl 14–175 Laboratory press -laitteistolla ja tuotetuista jakeista analysoitiin pääravinnepitoisuudet Luken laboratoriossa.

#### 5.1.1. Biopaja – Infrapunakuivaus

Biopajan kuivausteknologiana Jokioisilla toimii PSS-Nanopar SBD 250 pilot-kuivuri, joka yhdistää infrapunakuivauksen ja hihnakuvauksen (Kuva 3). Massa syötetään kuljetinhihnalle joko pursottimen tai syöttölaatikon avulla tasaiseksi pediksi. Kuivurin läpi kulkevaa massaa lämmitetään keskitaajuuden infrapunasäteilyllä (MIR) ja kosteuden poistoa avustetaan imulaatikoilla hihnan alapuolelta. Kuivauslämpötila asettuu 30–500 °C välille ja laitteen prosessointiteho 5–30 kg/h. Ajon aikaisesti on mahdollista säätää biomassapedin korkeutta, kuljettimen nopeutta, paneelien tehoja sekä imun voimakkuutta. Ajon aikana mitataan pedin pintalämpötiloja infrapunälämpömittarilla ja kuivatun jakeen kuiva-ainepitoisuutta pika-analysaattorin avulla.



**Kuva 3.** PSS-Nanopar SBD 250-infrapunakuivurin toimintaperiaate.

Infrapunakuivauskokeet toteutettiin 3.3–27.5 välisenä aikana Biopajalla. Kokeiden raaka-aineena käytettiin Jokioisten Minkiön navetan biokaasulaitoksen mädätysjäännöksestä 20.2. 2025 linkoseparoitua kuivajaetta, joka säilöttiin pakastettuna. Ajoparametrien optimoimiseksi toteutettiin 10 kpl 5–15 kg esikoetta ja varsinaiset koeajot toteutettiin kolmena 10 kg rinnakkaisena ajona.

### 5.1.2. TM Systems Oy – Leijupetikuivaus

TM Systems Oy:n SuperDryer™-kuivuritekniologia perustuu leijupeti- ja flash-tekniikoiden yhdistelmään, jossa biomassaa kuivataan jatkuvatoimisesti kuumassa ilmavirrassa (Kuva 4). Massa syötetään repivällä ruuvilla kuivaustorniin, johon puhalletaan kolmesta eri korkeudesta lämmitettyä ilmaa. Koelaitteversiossa kuivausilma lämmitetään öljypolttimella. Tornissa kuivava kiintoaine kulkeutuu keventyessään ylöspäin ja lopulta ilmavirran mukana erotussyklooniin, jossa kuiva lopputuote laskeutuu ja lopulta poistuu kuivurista. Kuivausajoa kontrolloidaan säätämällä syöttöilman lämpöä, haihdutuspuhallusta sekä massan syöttöä. Kuivauslämpötila asettuu 60–200°C välille ja prosessointiteho 100–200 kg/h. Automaatio mittaa kuivausilman lämpötilan ennen kuivatusta ja kuivauksen jälkeen, kirjaa ajonaikaisen sähkönkulutuksen. Kuivatun lopputuotteen kuiva-ainepitoisuutta seurataan pika-analysaattorilla.



**Kuva 4.** TM Systems Oy:n Super Dryer -pilot leijupetikuivuri.

Leijupetikuivaus-pilotkoe toteutettiin 27.2.2025 Turussa TM Systemsin koelaitoksella. Raaka-aine linkoseparoitiin 20.2.2025 Minkiön biokaasulaitoksella ja toimitettiin koelaitokselle 24.2.2025. Ensiksi toteutettiin 0,5 h esitesti massan teknologiaan soveltuvuuden selvittämiseksi ja sitten kaksi virallista koeajoa: ensin 2 h 46 min pituinen ajo ja sitten 2 h pituinen ajo.

### 5.1.3. Ecomation Oy – Vakuumikuivaus

Ecomation Oy:n vakuumikuivausteknologia hyödyntää konduktiota ja alipainetta (Kuva 5). Panostoitumiseen rummussa massaa sekoitetaan lapasekoittimella ja lämmitetään vaipan kautta samalla kun sisälle imetään alipaine vakuumpumpulla. Ajoa seurataan kuivurin alla sijaitsevalla vaa'alla, paine- ja lämpötila-antureilla. Kuivausolosuhteita voidaan optimoida säätämällä lämpötilaa ja painetta. Massanmuutoksen pysähtyessä on haihtuva kosteus poistunut rummista, jolloin paine voidaan normalisoida ja panos purkaa. Käytetyn kuivurin tilavuus oli 0,25m<sup>3</sup> ja panoskoko 120 kg.



**Kuva 5.** Ecomation Oy:n suurempi 1 m<sup>3</sup> Pilot-vakuumikuivuri.

Vakuumikuivaus-pilotkoe toteutettiin Rantasalmella 24.–27.3.2025 välisenä aikana. Toisista pilotoinneista poiketen tämän kokeen raaka-aineeksi valikoitui logistisesti lähempänä sijaitsevan Maaningan navetan biokaasulaitoksen mädätysjäännös. Myös Maaningan laitoksella mädätysjäännöstä oli tarkoitus separoida linkoseparaattorilla, mutta tämä epäonnistui liian alhaisen kuiva-ainepitoisuuden vuoksi. Varavaihtoehtona päädyttiin käyttämään ruuipuristinseparointia, jonka kuivajae toimitettiin koelaitokselle 21.3. Koe-ajot toteutettiin neljänä ajona (1. 100 kg, 6 h 30 min, 2. 120 kg, 8 h 25 min, 3. 120 kg, 8 h 30min ja 4. 64,4 kg, h 40 min).

### 5.1.4. Pelletöintikokeet Biopajalla

Kuivauskokeiden näytteistä toteutettiin kaksi 2 kg pelletöintiajoa 5:1 pelletöintimariisilla. Koska näytteiden kosteuspuitoisuudessa oli vaihtelua, säädettiin se ajokohtaisesti 13 %:iin. Pelletöintiin käytettiin Amandus Kahl Laboratory Press type 14–175 pelletöintilaitetta (Kuva 6). Laitteen toiminta perustuu tasomatriisiin, jonka läpi kaksi pyörivää kolleripyörää puristaa syötetyn biomassan. Pelletti muodostuu matriisin puristuskanavassa lämpötilan noustessa kollerin puristaessa massaa matriisin kartiomaisiin reikiin. Matriisissa puristuvan pelletin pituus määrittyy matriisin alla pyörivän leikkurin etäisyydestä matriisiin ja käytettävään massan lämpötilasta. Laitteen syöttö on toteutettu tärysytin avulla. Laite mittaa matriisin lämpötilaa ja kollerin pyörimistäajuutta. Laitteen käytön yhteydessä matriisin ja laitteesta ulostulevan pelletin lämpötilaa seurattiin infrapunälämpömittarilla ja pelletin laatua aistinvaraisesti.

Onnistunut pelletöityminen edellyttää noin 45 °C lämpötilaa. Tuoreet pelletit kuivattiin ime-mällä huoneilmaa pellettien läpi infrapunakuivurissa.



**Kuva 6.** Pelletöintikoneessa pyörivät kolleripyörät puristavat massan tasomatriisin kartion-mallisten reikien lävitse.

### 5.1.5. Näytteenotot ja analyysit

Näytteet kerättiin tuoreeltaan separointien, kuivauspilotointien ja pelletöintien yhteydessä. Koontinäytteet pakastettiin ja toimitettiin koottuna Luken laboratorioihin kahtena kerran-teenä. Koemateriaalit säilytettiin suljetussa astiassa kuljetusten ja kokeiden väliset ajat pyrkien pitämään välit mahdollisimman lyhyinä kosteiden näytteiden osalta.

Kuiva-aine- ja orgaanisen aineenpitoisuudet määritykset toteutettiin standardin SFS 30081 mukaisesti. Kokonaistypen määritys (Ntot) tehtiin Kjeldahl-tekniikalla. Rikkihappopoltto ja tislauksella Kjeltac analyysointilaitteella. Sisäinen menetelmä JOK3004. Liukoisen ammoniumtypen (NH<sub>4</sub>-N) määritys tehtiin suoralla tislauksella Kjeltac-analyysointilaitteella. Fosfori (P), kalium (K) ja hiili (C)määritykset tehtiin ICP-OES:llä. Sisäinen menetelmä JOK300.

## 5.2. Kuivauspilotointien tulokset

### 5.2.1. Lopputuotteen kuivuus ja prosessien energiankulutus

Tutkitut teknologiat saavuttivat asetetun kuiva-ainepitoisuustavoitteen (min 85 %) vaihtelevasti (Taulukko 4). Infrapunakuivaukselta tavoitteen saavuttaminen vaati kolme peräkkäistä käsittelyä ja massa tuli myös hienontaa ensimmäisen kuivauskäsittelyn jälkeen. Leijupeti-kuivauksessa tavoite jäi saavuttamatta ja lopputuotteeseen jäi huomattavia määriä kosteutta.

Vakuumikuivauksen lopputuote ylsi tavoitteeseen 120 kg ajoissa, mutta viimeisten kosteusprosenttien haihduttaminen oli kyseisestä materiaalista haasteellista.

**Taulukko 4.** Kuiva-ainepitoisuudet eri kuivausprosesseissa.

Teknologia	Syöte		Lopputuote	
	Määrä kg	Kuiva-ainepitoisuus %	Määrä kg	Kuiva-ainepitoisuus %
<b>Infrapuna-kuivaus</b>	10	22,9	2,3	91,2
1. käsittely (n=2)	10	22,9	6,2	35,4
2. käsittely (n=2)	6,2	35,4	3,6	63,6
3. käsittely (n=2)	3,6	63,6	2,3	91,2
<b>Leijupetikuivaus</b>	621	22	175	72,0
<b>Vakuumikuivaus</b>	404	28,4	143	80,3
Ajo 1.	100	28,4	36,4	78,0
Ajo 2.	120	28,4	39,7	85,8
Ajo 3.	120	28,4	39,6	86,1
Ajo 4.	64	28,4	27,3	67,0

Energiankulutuksessa keskiöön nousi eri teknologioiden lämmönlähteet (Taulukot 5–7). Infrapunakuivauksen energiankulutuksesta valtaosa tapahtuu infrapunapaneeleissa, kun imupuhalluksen ja ohjauksen energiakulutus jää noin neljännekseen kokonaiskulutuksesta. Leijupetikuivaimessa valtaosa energiankulutuksesta kuluu puhallusilman lämmittämiseen ja puhaltimille, syöttöön ja sekoittimille kuluu vain murto-osa kokonaiskulutuksesta. Myös vakuumikuivauksen energiankulutuksesta valtaosa tulee rummun lämmittämisestä ja vakuumin osuudeksi jää noin kahdeksannes kokonaiskulutuksesta. Prosessointitehoiltaa infrapunakuivuri ja vakuumikuivuri olivat samaa kokoluokkaa, kun taas leijupetikuivurin prosessointiteho oli huomattavasti suurempi.

**Taulukko 5.** Infrapunakuivauksen energiankulutus.

Teknologia	Prosessi		Energiankulutus kWh			
	Ajon kestot s	Prosessointiteho kg/h	Lämmitys	Ohjaus	Puhaltimet	kWh / l H <sub>2</sub> O
<b>Infrapunakuivaus</b>	7 367	4,9	12,3	2,0	2,5	2,2
1. käsittely (n=2)	2 875,5	12,5	5,2	0,8	1,0	1,8
2. käsittely (n=2)	2 567,5	8,7	4,2	0,7	0,9	2,2
3. käsittely (n=2)	1 924	6,6	2,9	0,5	0,6	3,1

Infrapunakuivauksen energiankulutukseksi muodostui 2,2 kWh/ l H<sub>2</sub>O, jolloin näiden tulosten perusteella tuotantomittakaavaan skaalautuessa mädätteen kuivajakeen kuivauksessa (TS 25->90 %) olisi varauduttava 1 430 kWh/t energiankulutukseen. Luken muissa hankkeissa toteutettujen pilot-kokeiden perusteella infrapunakuivauksen energiankulutus pienenee skaalattaessa tuotantoa suurempaan mittakaavaan, jolloin noin -40 % pienemällä infrapunakuivauksen energiankulutukseksi muodostuisi 1,3 kWh/ l H<sub>2</sub>O ja 845 kWh /t.

**Taulukko 6.** Leijupetikuivauksen energiankulutus.

Teknologia	Prosessi		Energiankulutus kWh			
	Ajon kesto s	Prosessointiteho kg/h	Lämmitys	Puhaltimet ja pumput	Sekoittimet ja syöttöruuvi	kWh / l H <sub>2</sub> O
Leijupetikuivaus	19 000	117,7	612,0	12,3	4,1	1,4

Leijupetikuivauksen energiankulutukseksi muodostui 1,4 kWh/l H<sub>2</sub>O, jonka perusteella tuotantomittakaavassa kuivaukselle olisi odotettavissa 910 kWh /t energiankulutus. TMS pilotlaitteistossa on käytetty ohuempaa lämmöneristystä eikä laitteessa ole vastaavaa lämmöntalteenottoa, kuin teollisen mittakaavan laitteistossa. Laitetoimittajan mukaan näiden avulla energiankulutus puolittuu skaalatta tuotantomittakaavaan, jolloin kulutukseksi muodostuisi arvioilta 0,7 kWh/l H<sub>2</sub>O ja 455 kWh/t.

**Taulukko 7.** Vakuumikuivauksen energiankulutus.

Teknologia	Prosessi		Sähkönkulutus kWh			
	Ajon kesto s	Prosessointiteho kg/h	Esilämmitys	Lämmitys	Vakuumpumppu	kWh / l H <sub>2</sub> O
Vakuumikuivaus	108 300	13,4	47,8	150,8	34,0	0,9
Ajo 1.	23 400	15,4	12,1	36,3	8,3	0,9
Ajo 2.	30 300	14,3	14,5	45,7	10,4	0,9
Ajo 3.	30 600	14,1	14,3	46,0	10,5	0,9
Ajo 4.	24 000	9,7	6,9	22,8	4,8	0,9

Vakuumikuivauksen energiankulutukseksi muodostui 0,9 kWh / l H<sub>2</sub>O. Tuotantomittakaavalle tämä merkitsisi 585 kWh /t energiankulutusta. Jatkuvatöimisessä prosessissa esilämmityksen rooli pienenee huomattavasti ja tällöin myös kokonaisenergiankulutus laskee 15–20 %. Tällöin tuotantomittakaavan energiankulutukseksi muodostuisi arviolta 0,7 kWh / l H<sub>2</sub>O ja 455 kWh/t.

### 5.2.2. Kuivattujen jakeiden pelletöitävyys

Kaikki kolme kuivattua jakeita pelletöityivät onnistuneesti (Kuvat 7–9). Valitut ajoparametrit (13 % kosteuspitoisuus ja 5:1 puristussuhde) valittiin aikaisempien kokemusten perustella ja nämä sopivat näytteille ongelmitta. Kaikki tuotetut pelletit pysyivät koossa ja olivat lujia. Vakuumikuivattu näyte oli lähtökohtaisesti jakeena hieman erilainen (hienojakoisempi ja pölyisempi), mutta se ei käyttäytynyt pelletöinnissä muista poikkeavasti. Pelletöintilämpötilat nousivat infrapunakuivatulla 74 °C:een, leijupetikuivatulla 79 °C:een ja vakuumikuivatulla 78 °C:een. Energiankulutus oli kaikilla näytteillä samansuuruinen  $58 \pm 2$  kWh/t, joka vastaa kirjallisuusarvoja



**Kuva 7.** Infrapunakuivauksen kuivajakeesta tuotetut pelletit.



**Kuva 8.** Leijupetikuivauksen kuivajakeista tuotetut pelletit



**Kuva 9.** Vakuumikuivatusta kuivajakeesta tuotetut pelletit.

### 5.2.3. Lopputuotteen ravinnepitoisuus

Vakuumikuivauskokeissa käytetty kuivajae poikkesi Infrapunakuivaukseen ja leijupetikuivaukseen käytetystä kuivajakeesta etenkin orgaanisen aineksen ja fosforin pitoisuuksissa. Tarkastellessa kuivausten lopputuotteiden ravinnepitoisuuksia, huomataan että kuivausten aikana tapahtuu ravinnehävikkiä etenkin typen osalta (Taulukko 8).

**Taulukko 8.** Kuivauskokeiden syötteiden ja kuivajakeiden kuiva-aine, orgaaninen aines ja ravinteet.

	Kuiva-aine pitoisuus	Orgaaninen aines	Kokonais-typpi N	Ammonium-typpi NH <sub>4</sub>	Fosfori P	Kalium K	Hiili C
	% tp	pitoisuus % ka	% ka	% ka	% ka	% ka	% ka
<b>Infrapunakuivaus</b>							
Syöte	22,9	17,5	2,4	1,0	1,2	1,1	43,9
Kuivattu	91,2	15,6	2,0	0,5	1,1	1,2	43,8
<b>Leijupetikuivaus</b>							
Syöte	22,0	18,2	2,3	1,1	1,1	1,3	44,0
Kuivattu	72,5	17,9	2,6	0,8	1,1	1,3	44,7
<b>Vakuumikuivaus</b>							
Syöte	24,1	12,5	2,3	0,7	0,5	1,6	46,2
Kuivattu	85,7	13,5	1,6	0,2	0,4	1,6	46,0

Yhdelläkään valituista kuivausteknologioista ei ollut huomattavaa vaikutusta kalium- tai hiilipitoisuuteen. Fosforin osalta oli havaittavissa pientä hävikkiä infrapuna- ja vakuumikuivausten osalta, mutta tämä voi johtua mittaushajonnasta. Typen hävikkiä oli havaittavissa kaikissa teknologioissa, etenkin liukoisen typen häviönä. Suurinta se oli vakuumikuivauksessa. Pelletöidyt tuotteet eivät poikenneet suuresti lähtötilanteen ravinnepitoisuuksista (Taulukko 9).

**Taulukko 9.** Pelletöityjen kuivajakeiden kuiva-aine, orgaaninen aines ja ravinteet.

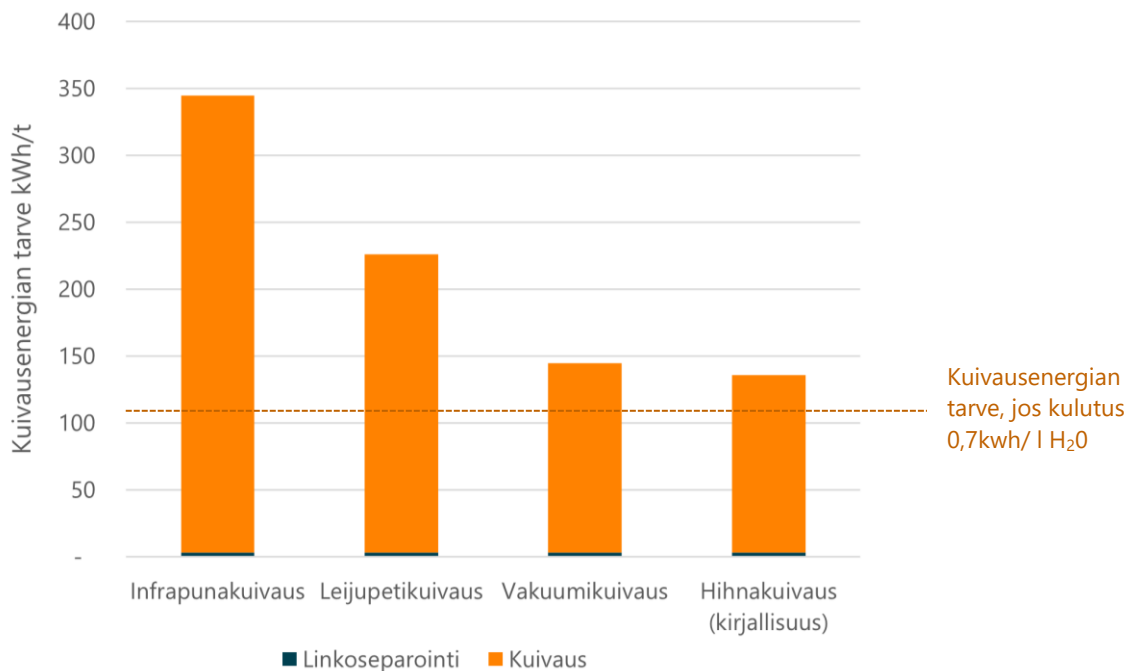
Pelletit	Kuiva-aine	Orgaaninen aines	Kokonais-typpi N	Ammonium-typpi NH <sub>4</sub>	Fosfori P	Kalium K	Hiili C
	% tp	pitoisuus % ka	% ka	% ka	% ka	% ka	% ka
<b>Infrapunakuivattu</b>	89,1	17,1	2,1	0,4	1,2	1,2	43,5
<b>Leijupetikuivattu</b>	88,7	17,5	2,3	0,5	1,2	1,4	43,3
<b>Vakuumikuivattu</b>	90,8	13,5	1,7	0,2	0,6	1,6	44,3

Pelletöidyissä lopputuotteissa ainoastaan leijupetikuivatusta on havaittavissa lisää ravinteiden hävikkiä. Tämä selittyy sillä, että näytettä tuli kuivata lisää, jotta se olisi pelletöintikosteudessa. Vakuumikuivatun syötteen (Maaningan ruuviseparoitu kuivajae) alhaisempi orgaanisen aines- ja fosforipitoisuus on havaittavissa myös lopputuotteessa. Tuotettujen pellettien ravinnepitoisuudet ovat alhaisia ja typen ja fosforin suhde on kaikissa saamaa luokkaa 1,5–2:1.

## 6. Lannoitepelletin tuotannon ja käytön kustannukset ja vaikutukset paikalliseen ravinteiden kierrätykseen

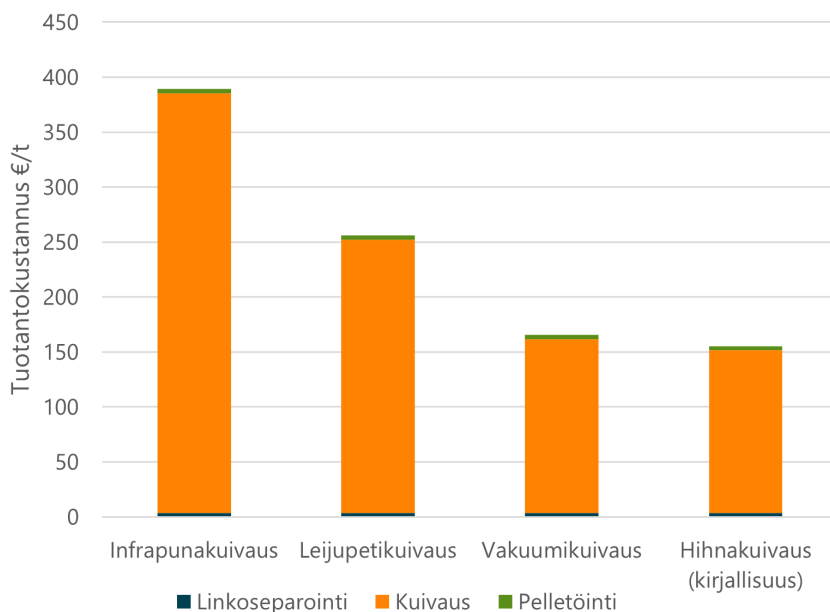
### 6.1. Prosessoinnin kustannukset

Lannoitepelletin kuivausenergiankulutukseksi saatiin kirjallisuuskatsauksessa 135 kWh/t mädätettä. Kun näitä kappaleessa 3.2 esitettyjä lukuja vertaa kuivauspilotointien tuloksiin, erottuu kuivausteknologian keskeinen merkitys kokonaisuudelle. Kirjallisuudesta hihnakuivaukselle selvitetty 0,84 kWh/l H<sub>2</sub>O on alhaisempi kuin toisille kuivureille kokeissa mitatut energiankulutukset ja siten myös kuivausenergian kulutus on alhaisempi (Kuva 10). Linkoseparoinnin sähkönkulutus 3 kWh/t syötettä jää huomattavasti pienempään rooliin kuin infrapunakuivaus (342 kWh/t), leijupetikuivaus (223 kWh/t), vakuumikuivaus (142 kWh/t) tai hihnakuivaus (133 kWh/t).



**Kuva 10.** Kuivausenergian tarve vertailluilla kuivausteknologioilla.

Lannoitepelletin tuotannolle kuivaus oli vastaavasti merkitsevin kustannustekijä (Kuva 11). Pelletöinnin ja separoinnin kustannuksille jää 1–3 % osuus kokonaiskustannuksista. Lannoitepellettiton prosessoinnin hinnaksi (0,07e / kWh) muodostuu infrapunakuivauksella 389 €/t, leijupetikuivauksella 256 €/t, vakuumikuivauksella 165 €/t ja hihnakuivauksella 155 €/t. Jos verrataan tuotetun pelletin ravinteiden arvoa tuotantokustannuksiin, 2 % typpipitoisuudella ( $2 \pm 0,5$  €/kg, Luken kilpailutus 2025) pellettiton ravinteiden arvoksi muodostuisi korkeimmillaan 50 €/t, jolloin se kattaisi vain kolmanneksen tai vähemmän tuotannonkustannuksista. Fosfori-, kalium-, hivenravinne- ja hiilipitoisuuden rahallisen arvon määrittäminen on huomattavasti monimutkaisempaa ja nämä rajattiin ravinteiden arvon tarkastelun ulkopuolelle.



**Kuva 11.** Pellettitonin tuotantokustannukset eri kuivausteknologioilla.

## 6.2. Levityskustannusten vertailu

### 6.2.1. Menetelmä

Lannoitustoimet suunnitellaan tuotantokasvin lannoitustarpeen, lannoitusrajoitusten ja kyseisen viljelylohkon viljavuuden perusteella. Pelletöidyt kierrätyslannoitevalmisteet soveltuvat samoihin yleisiin lannoitteen levittämiin kuin mineraalilannoitteet. Tässä vertailussa pelletöityä mädätteen kuivajaetta ja linkoseparoinnissa syntyvää nestejätettä vertaillaan vaihtoehtoisena lannoitustoimena viljelytoiminnalle, joka pohjautuu mädätysjäännöksen ja mineraalilannoitteen /luomulannoitteen yhdistelmään. Vertailussa lannoitteita verrattiin toisiinsa lannoitetaan (lannoitusmäärä - lannoitustarve) ja kustannustarkastelun (hankintakustannus + levityskustannus) kautta. Tämän kustannusvertailun pohjana on käytetty seuraavia oletuksia:

1. Viljelylohkon oletettiin olevan kivennäismaata ja P-pitoisuuden 3. viljavuusluokassa. Lannoitustarve johdettiin Ympäristötuen ehdollisten tukien lannoitustason taulukkoarvojen mukaisesti:

Lannoitustarve	N kok*	N liuk	P
Säilörehunurmi	170	250	30
Rehuvilja	170	160	16

\*N kok rajoitukset koskevat vain lantapohjaisia tuotteita (>10 %) eli tässä laskennassa mädätettä, siitä prosessoitua pellettiä ja kananlanta pohjaista luomulannoitetta.

## 2. Vertailussa käytetyt lannoitevalmisteet:

Lannoite	N kok %	N liuk %	P %	K %	Hinta €/t
Mineraalilannoite	22,0	22,0	0	12,0	500*
Luomulannoite	8,0	0,4	1,0	5,0	675**
Mädäte	0,63	0,24	0,25	0,28	
Nestejae***	0,23	0,14	0,04	0,23	
Pelletti	2,10	0,43	1,05	1,15	155****

\*Hinta perustuu Luken 2025 toteuttamaan lannoitetuotteiden kilpailutukseen Mineraalilannoitteeksi valikoitui tuote, jonka käyttöä eivät rajoita fosforin lannoitusrajat.

\*\*Hinta perustuu hintatiedusteluun tammikuussa 2026

\*\*\*Nestejakeen ravinnearvoina käytetty Biokanta-hankkeen tuloksia Luke Jokioisten biokaasulaitoksen linkouskokeista.

\*\*\*\* Pellettilannoitteen hankinta-arvona pellettitonin tuotantokustannusta hihna-kuivauksella. Nestejakeen oletetaan syntyvän pelletin tuotannon sivujakeena, jolloin sen tuotantokustannus on 0 €.

3. Nestejaetta oletettiin syntyvän suhteessa 13 :1 tuotettuun pellettiin nähden, kts. kpl 4.
4. Fosforia tarkasteltiin vuositasolla, jolloin fosforin tasausta ei huomioitu vaihtoehtona saavuttaa tarvittavat typpitasot
5. Työkustannuksien oletettiin vastaavan Työteho-seuran 2024 selvittämiä urakointihintoja<sup>37</sup>. Rakeisen lannoitteen levitys 69 €/ha ja lietteen 3,14 €/m<sup>3</sup>.
6. Pellettilannoitteen oletettiin vastaavan levitettävyydeltään mineraalilannoitetta ja levitysmäärän oletettiin Luken levityskoetulosten perusteella olevan max 800 kg/ha/ajo<sup>38</sup>.
7. Maanmuokkaustoimet oletettiin olevan samat jokaiselle eri lannoitustavalle ja siten niitä ei huomioitu erikseen.

Näiden oletusten pohjalta tarkasteltiin hehtaarikohtaisia levityskustannuksia neljässä skenaariossa:

- **Nurmi**-skenaariossa säilörehunurmen viljelyssä lähtökohtana on lannoitus mädätteellä ja mineraalilannoitteella ja näiden korvaajina nestejae ja pelletti. Lannoitus jaetaan kahdelle sadolle pintalevityksenä.
- **LuomuNurmi**-skenaariossa säilörehunurmen viljelyssä lähtökohtana on lannoitus mädätteellä ja kaupallisella luomulannoitteella ja näiden korvaajina nestejae ja pelletti.
- Lannoitus jaetaan kahdelle sadolle pintalevityksenä.
- **Vilja**-skenaariossa kevätiljan viljelyssä lähtökohtana on lannoitus mädätteellä ja mineraalilannoitteella ja näiden korvaajina nestejae ja pelletti. Lannoitus annetaan rakeilla kylvölannoituksena ja lietteillä pintalevityksenä
- **LuomuVilja**-skenaariossa kevätiljan viljelyssä lähtökohtana on lannoitus luomulannoitteella ja korvaajina nestejae ja pelletti. Lannoitus annetaan pintalevityksenä.

### 6.2.2. Tulokset

Jokaisessa skenaariossa keskeiseksi lannoitusmääriä rajoittavaksi tekijäksi nousi fosfori. Nurmi-skenaariossa sallittu fosforilannoituksen taso mahdollistaa korkean kierrätyslannoituksen määrän, mutta silti mineraalilannoitus on tarpeen täyttämään tarvittu typpilannoitustaso (Taulukko 10).

**Taulukko 10. Nurmi-skenaarion lannoitusvaihtoehdot.**

Levitysmäärä	kg/ha	N kok	N liuk	P	K	Kustannus €/ha		
						Levitys	Hankinta	Yhteensä
Lannoitustarve		170	250	30				
<b>Mädäte</b>	12 000	76	29	30	33	40 €		
<b>Mineraalilannoite</b>	1 005	221	221	0	121	138 €	628 €	
Lannoitustase		127	0	0	154			805 €
<b>Nestejae</b>	24 000	55	34	10	55	84 €		
<b>Pelletti</b>	1 900	40	8	20	22	206 €	295 €	
<b>Mineraalilannoite</b>	945	208	208	0	113		591 €	
Lannoitustase		133	0	0	190			1 175 €

Nurmen lannoituksessa mineraalilannoitteen korvaaminen ei suoraan tuota kustannussäästöjä nykyisillä markkinahinnoilla ja pelletin tuotantokustannuksilla. Suurempien levitysmäärien myötä levitystyön kustannukset nousevat korkeammiksi ja säästöt mineraalilannoitteen käytössä eivät pysty vastaamaan tähän. Mädätysjäännöksen separointi nestejakeeksi mahdollistaa suuremman kierrätyslannoituksen tason, sillä nestejae sisältää vähemmän fosforia kuin mädätysjäännös. Lannoitustaseessa kasvatettu kierrätyslannoitus eroaa mineraalilannoituksesta noin neljänneksen suurempana kaliumlannoituksena.

Luomulannoitteiden alhaisempi typpipitoisuus asettaa oman haasteensa lannoituksen suunnittelussa. LuomuNurmi-skenaariossa tavoiteltua typpitasoa ei pystytty saavuttamaan (Taulukko 11).

**Taulukko 11. LuomuNurmi-skenaarion lannoitusvaihtoehdot.**

Levitysmäärä	kg/ha	N kok	N liuk	P	K	Kustannus €/ha		
						Levitys	Hankinta	Yhteensä
Lannoitustarve		170	250	30				
<b>Mädäte</b>	9 000	57	22	22	25	30 €		
<b>Luomulannoite</b>	800	64	3,2	8	40	69 €	771 €	
Lannoitustase		-49	-225	0	65			870 €
<b>Nestejae</b>	24 000	55	34	10	55	84 €		
<b>Pelletti</b>	1 900	40	8	20	22	206 €	295 €	
Lannoitustase		-75	-208	0	77			585 €

Säilörehunurmen tuotannossa kaupallisen luomulannoitteen korvaaminen on taloudellisesti kannattavaa, jos pelletin hinta vastaa tuotantokustannusta. Vaikka levityskustannukset ovat nestejakeen ja pelletin käytössä suuremmat, säästöt hankintakuluissa ovat huomattavasti pienemmät. Lannoitusmäärät eivät kuitenkaan vastaa kovin hyvin kasvin tarpeisiin ja tämä tulee vaikuttamaan negatiivisesti sadonmuodostukseen. Mädätteen linkoseparointi mahdollistaa huomattavasti korkeamman mädätteen hyödyntämisen ja näissä levitysmäärissä on huomioitu myös huomioitu missä suhteessa pellettiä ja nestejatetta muodostuu. Lannoitustarpeeseen pystyttäisiin vastaamaan vielä paremmin, jos pelletin käyttömääriä laskettaisiin ja nestejakeen nostettaisiin.

Viljaskenaarioissa pelletin fosforipitoisuuden rooli rajoittavana tekijänä korostuu. Kumpikin viljaskenaario pääsee lähemmäs lannoitustarvetta, jos pellettiä ei käytetä ja lannoitus toteutetaan nestejakeella (Taulukot 12 ja 13).

**Taulukko 12. Vilja**-skenaarion lannoitusvaihtoehdot.

Levitysmäärä	kg/ha	N kok	N liuk	P	K	Kustannus €/ha		
						Levitys	Hankinta	Yhteensä
Lannoitustarve		170	160	16				
<b>Mädäte</b>	6 500	40	15	16	18	21 €		
<b>Mineraalilannoite</b>	655	145	145	0	79	69 €	328 €	
Lannoitustase		15	0	0	97			418 €
<b>Nestejæ</b>	41 000	94	57	16	94	143 €		
<b>Mineraalilannoite</b>	465	103	103	0	34	69 €	291 €	
Lannoitustase		27	0	0	150			502 €

Vilja-skenaariossa mädätteen fosforipitoisuus rajaa levitysmäärät alhaiseksi. Nestejakeella pystytään korvaamaan mineraalilannoitteen käytöstä noin neljännes, mutta mineraalilannoitteen rooli jää edelleen keskeiseksi lannoitustarpeen saavuttamiseksi. Mineraalilannoitteen korvaamisen säästö ei vastaa levityskustannusten kasvua ja siten kokonaiskustannukset kasvavat noin +20 %.

**Taulukko 13. LuomuVilja**-skenaarion lannoitusvaihtoehdot

Levitysmäärä	kg/ha	N kok	N liuk	P	K	Kustannus €/ha		
						Levitys	Hankinta	Yhteensä
Lannoitustarve		170	160	16				
<b>Luomulannoite</b>	1 600	128	6	16	80	138 €	1 080 €	
Lannoitustase		-42	-154	0	80			1 218 €
<b>Nestejæ</b>	41 000	94	57	16	94	143 €		
Lannoitustase		-76	-103	0	94			143 €

Valituilla luomutuotteilla LuomuVilja-skenaariossa parhaiten vastattiin lannoitustarpeeseen jättämällä myös mädäte pois ja keskittymällä alhaisen fosforipitoisuuden luomulannoitteen ja nestejakeeseen (Taulukko 13). Luomulannoitteella päästiin lähemmäs lannoitustarvetta (3 x N kuin mädätteellä), mutta kustannukset olivat huomattavasti nestejakeella lannoittamista korkeammat. Tällöin nestejakeella lannoittaminen on varteenotettava vaihtoehto, etenkin jos fosforin tasausta hyödynnetään korkeamman typpilannoitustason saavuttamiseksi.

### 6.3. Tuotettujen ravinteiden paikallinen kierrättäminen ja lannoitusomavaraisuuden aste

Verrattaessa kappaleessa 6.2. hahmottuneita levitysmääriä kappaleessa 4. rajattuun laitoskoluokkaan ja kirjallisuustietoon selviää kuinka laajaa paikallista ravinteiden kierrättämistä tämän kokoluokan biokaasulaitos tukisi. 10 000 t biokaasulaitoksella tuotettavat 7 536 t nestejæta ja 586 t pellettiä riittäisivät paikallisesti lannoittamaan 310 ha säilörehunurmea. Vastavasti viljan viljelyyn nestejæ riittäisi 180 ha lannoittamiseen, mutta tässä tapauksessa pelletille

tulisi etsiä joku toinen käyttökohde. Laskettaessa taaksepäin 10 000 lietalantatontin tuottamiseen tulisi alueella olla 23,46 t/eläinpaikka tuotoksella<sup>39</sup> 430 lypsylehmää, joiden rehuhuolto edellyttäisi 500–600 ha viljelyalaa.

## 6.4. Johtopäätökset

Lannoitepellettituotannolle keskeisin kustannustekijä on kuivauksen energiankulutus. Toteutetut kuivauspilotoinnit tuottivat kirjallisuustietoon verrattuna haastavamman tilannekuvan. Laitosvalmistajien näkemykset tehokkuuden parantumisesta, kun tuotanto skaalataan teolliseen mittakaavaan, puolsivat kirjallisuuden pohjalta saatua käsitystä kuivauksen energiankulutuksen tasosta. Kuivausteknologioiden välillä huomattiin eroja sekä ravinteiden haihtumisessa, että soveltuvuudessa mädätteen kuivaukseen. Linkoseparoinnin ja pelletöinnin kustannukset olivat vain murto-osan kuivauksen kustannuksista.

Mädätteestä tuotetun pelletin ja nestejakeen vahvuus on erityisesti siinä, että mädätteen fosforista lähes kaikki kanavoituu pellettiin ja nestejakeen ravinnesuhteet ovat huomattavasti lähempänä yleisimpien viljelykasvien tarvetta. Säilörehunurmen viljelyyn sekä pelletti että nestejake soveltuvat sellaisenaan etenkin luomulannoitukseen. Mineraalilannoitetta näillä tuotteilla voi korvata kohtuullisin määrin, mutta mineraalilannoite tarvitaan osana lannoitusta, jos typpilannoitus aiotaan pitää lannoitusrajojen maksimitasolla. Viljan viljelyyn nämä tuotteet sopeutuvat parhaiden alhaisen fosforipitoisuuden mailla. Yksi mahdollinen käyttökohde on myös korkeamman fosforilannoituksen tarvitsevat vihannekset ja erikoiskasvit. Fosforin tasaus mahdollistaa fosforipitoisempien pellettien sisällyttämisen lannoitukseen, mutta tällöin vuosittain vain osa pelloista voi vastaanottaa fosforilannoitusta. Levityskustannuksien osalta tuotettu pelletti ja nestejake olivat kilpailukykyisiä kaupalliselle luomulannoitteelle, vaikka tuotantokustannukset kanavoitiin tuotteen hintaan. Mineraalilannoitteella lannoittaminen oli nykyhinnoilla edullisempaa, vaikka tuotettu nestejake ja pelletti soveltuivatkin mineraalilannoitteen korvaamiseen. Jos mineraalilannoitteiden hinnat nousevat tulevaisuudessa, tarjoavat nämä tuotteet kustannustehokkaan vaihtoehdon.

Paikallisen ravinnekierrätyksen näkökulmasta pelletin ja nestejakeen jalostaminen tukee etenkin paikallisen säilörehuntuotannon ravinnekierrätystä. Biokaasulaitoksesta saatavat lannoitteet tukevat paikallista ravinneomavaraisuutta ja etenkin prosessoituna mahdollistavat eläintalouden fosforin siirron korkean fosforipitoisuuden alueilta kohteisiin, jossa siitä on vajausta. Kierrätyslannoitevalmisteiden käyttö myös edesauttaa hiilensidontaa ja sillä on maanparannusvaikutuksia, joita tähän tarkasteluun ei sisällytetty.

## Viitteet

- <sup>1</sup> Kymäläinen, M. & Pakarinen, O. 2015. Biokaasuteknologia: Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen. Hämeen ammattikorkeakoulu.
- <sup>2</sup> Marttinen, S., Tampio, E., Sinkko, T., Timonen, K., Luostarinen, S., Grönroos, J. & Manninen, K. 2015. Biokaasulaitokset - syötteistä lopputuotteisiin : Energia, ravinteet ja ympäristövaikutukset. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 14/2015. Luonnonvarakeskus. Helsinki.
- <sup>3</sup> Luostarinen, S. (toim.) 2013. Biokaasuteknologiaa maataloilla 1: Biokaasulaitoksen hankinta, käyttöönotto ja operointi - käytännön kokemuksia MTT:n maatilakohtaiselta laitokselta. MTT raportti 113.
- <sup>4</sup> Turley, D., Hopwood, L., Burns, C. & Di Maio, D. Assessment of Digestate Drying as an Eligible Heat Use in the Renewable Heat Incentive. Report No. 16-015.5. The Bioeconomy Consultants NNFC, York, United Kingdom, 2016, s. 28.
- <sup>5</sup> Hautala, M., Jokiniemi, T. & Ahokas, J. 2013. Maatilakuivurit. Maataloustieteiden laitoksen julkaisuja 28. 107 s.
- <sup>6</sup> Saalasti Biomass. Dewatering Press - Great energy saving potential. <https://saalasti.com/dewatering-press/> (viitattu 17.1.2025).
- <sup>7</sup> Cambi 2024. Sludge Dryers: Optimise Energy Use with Thermal Hydrolysis (julkaistu 5.3.2024). <https://www.cambi.com/blog/optimize-sludge-dryers> (viitattu 17.1.2025).
- <sup>8</sup> Suez Water Engineering & Construction. Drying sludge unit energy consumption. <https://www.suezwaterhandbook.com/processes-and-technologies/dewatered-sludge-treatment/drying/drying-unit-energy-consumption> (viitattu 17.1.2025).
- <sup>9</sup> Chen, G., Lock Yue, P. & Mujumdar, A.S. 2002. Sludge Dewatering and Drying. *Drying Technology* 20: 883–916.
- <sup>10</sup> Li, J., Wu, C.-W., Fraikin, L., Salmon, T., Toye, D., Nistajakis, E. & Léonard, A. 2019. Convective drying of sawdust-sludge mixtures: The effect of the sludge matrix, *Drying Technology* 37: 920–927.
- <sup>11</sup> Lijuan, Z., Junhong, Y., Shanshan, W. & Zhonghua, W. 2020. CO-drying characteristics of sticky sewage sludge pre-conditioned with biomass and coal. *Drying Technology* 38: 2083–2093.
- <sup>12</sup> Liu, Z., Tan, X., Wang, Y., Zou, W. & Zhang, C. 2020. Effect of temperature and bulking agents on deep bio-drying of high-solid anaerobically digested sludge. *Drying Technology* 38: 1904–1914.
- <sup>13</sup> Cai, Z.L., Ma, X.Q., Qing, X. & Yu, Z.S. 2015. Drying Kinetics and Characteristics of Sewage Sludge/Rice Straw Mixture. *Drying Technology* 33: 1500–1509.

- <sup>14</sup> Salamat, R., Scaar, H., Weigler, F., Berg, W. & Mellmann, J. 2022. Drying of biogas digestate: A review with a focus on available drying techniques, drying kinetics, and gaseous emission behavior. *Drying Technology* 40: 5–29.
- <sup>15</sup> Bennamoun, L. 2012. Solar drying of wastewater sludge: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16: 1061–1073.
- <sup>16</sup> Mathioudakis, V.L., Kapagiannidis, A.G., Athanasoulia, E., Paltzoglou, A.D., Melidis, P. & Aivasidis, A. 2013. Sewage Sludge Solar Drying: Experiences from the First Pilot-Scale Application in Greece. *Drying Technology* 31: 519–526.
- <sup>17</sup> Krawczyk, P. & Badyda, K. 2011. Modeling of thermal and flow processes in a solar wastewater sludge dryer with supplementary heat supply from external sources. *Journal of Power Technologies* 91(1): 37–40.
- <sup>18</sup> Mirara, S.W., Septien, S., Singh, A., Velkushanova, K. & Buckley, C.A. 2020. Drying of faecal sludge from VIP latrines through a medium infrared radiation process. *Water SA* 46(3).
- <sup>19</sup> Nugent, J.E. 1997. Multi pass, continuous drying apparatus. United States Patent US5634281A, 3.6.1997.
- <sup>20</sup> Lu, J. & Xu, S. 2021. Post-treatment of food waste digestate towards land application: A review. *Journal of Cleaner Production* 303: 127033.
- <sup>21</sup> Cai, L., Chen, T.-B., Gao, D. & Yu, J. 2016. Bacterial communities and their association with the bio-drying of sewage sludge. *Water Research* 90: 44–51.
- <sup>22</sup> Ma, J., Zhang, L., Mu, L., Zhu, K. & Li, A. 2019. Multivariate insights of bulking agents influence on co-biodrying of sewage sludge and food waste: Process performance, organics degradation and microbial community. *Science of The Total Environment* 681: 18–27.
- <sup>23</sup> Yuan, J., Li, Y., Wang, G., Zhang, D., Shen, Y., Ma, R., Li, D., Li, S. & Li, G. 2019. Biodrying performance and combustion characteristics related to bulking agent amendments during kitchen waste biodrying. *Bioresour Technol* 284: 56–64.
- <sup>24</sup> Viitikko, K., Kunnas, L., Laurinsilta, E., Kauppila, U.R., Schortemeyer, M. & Erlingson, M. 2018. Kierrätysravinnepohjaisten lannoitevalmisteiden kehittäminen ja käyttökokeilu – Raki2 loppuraportti. Ympäristöministeriö.
- <sup>25</sup> Hupponen, M, Luoranen, M & Horttanainen, M. 2012. Mädätysjäännöksen rakeistus, terminen kuivaus ja energiahyötykäyttö. LUT Energia, Tutkimusraportti 24. [https://lut-pub.lut.fi/bitstream/handle/10024/86811/VALMIS\\_JULKINEN\\_JATKE\\_KL\\_2012.pdf](https://lut-pub.lut.fi/bitstream/handle/10024/86811/VALMIS_JULKINEN_JATKE_KL_2012.pdf)
- <sup>26</sup> Biokasvu Oy. Kestävän kehityksen asialla. <https://biokasvu.fi/> (viitattu 2.7.2024).
- <sup>27</sup> Macon Oy 2025. YVA-Selostus, Kanala, Fertilex Oy. 9.10.2025.
- <sup>28</sup> DTS Finland. Mikroterminen menetelmä. <https://www.dtso.fi/dts-menetelma/> (viitattu 2.7.2024).
- <sup>29</sup> Gaiamare Oy. <https://auramare.fi/portfolio/gaiamare> (viitattu 2.7.2024).

- <sup>30</sup> ELY-keskus. Gaiamare jalostaa mädätysjäännöksestä kierrätyslannoitetta. <https://www.ely-keskus.fi/gaiamare-jalostaa-madatyjsjaannoksesta-kierratyslannoitetta> (viitattu 2.7.2024).
- <sup>31</sup> Ecomation, Pyrolysis solutions. <https://www.ecomation.com/pyrolysis-solutions> (viitattu 2.7.2024).
- <sup>32</sup> SFTEC 2023. <https://sftec.fi/> (viitattu 2.7.2024).
- <sup>33</sup> TM Systems. Industrial air and drying solutions. <https://tmsystems.com/> (viitattu 17.1.2025).
- <sup>34</sup> Luostarinen, S., Tampio, E., Lehtoranta, S., Valve, H., Laakso, J., Rasi, S., Pyykkönen, V., Markkanen, J., Heikkinen, J., Haapala, H., Winqvist, E., Lång, K., Timonen, K. & Silfver, T. 2023. Kestävät käytännöt biokaasutuotannossa. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2023:32. Valtioneuvoston kanslia, Helsinki. s. 177.
- <sup>35</sup> Nowak, M.; Bojarski, W.; Czekala, W. Economic and Energy Efficiency Analysis of the Biogas Plant Digestate Management Methods. *Energies* 2024, 17, 3021. <https://doi.org/10.3390/en17123021>
- <sup>36</sup> Luonnonvarakeskus 2022. Biokaasulaskuri. <https://biokaasulaskuri.luke.fi/?lang=fi> (viitattu 13.1.2025).
- <sup>37</sup> Työteho-seura 2025. Maatalouskoneurakointihintoja vuonna 2024 (alv. 0%). Alustavat tulokset 6.5.2025. <https://www.tts.fi/wp-content/uploads/2023/10/Urakoinnat-2024-alustavia-tuloksia-toukokuu-2025.pdf>
- <sup>38</sup> Seppänen, A, Kapuinen, P., Rasa, K. & Vasara, E. 2025. Pelletöityjen kierrätyslannoitevalmisteiden levitettävyyys. Tietokortti 2025. Luonnonvarakeskus. Helsinki.
- <sup>39</sup> Luostarinen, S., Grönroos, J., Hellstedt, M., Nousiainen, J. & Munther, J. 2017. Suomen normilanta laskentajärjestelmän kuvaus ja ensimmäiset tulokset. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 47/2017. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 54 s.



## Löydät meidät verkosta

**luke.fi**



Luonnonvarakeskus (Luke) Latokartanonkaari 9, 00790 Helsinki