



# Demonstraatioympäristö kiertotalouden sivuainevirroille

Hanne Soininen & Salla Pulliainen & Tiina Saario (toim.)



Hanne Soininen & Salla Pulliainen & Tiina Saario (toim.)

# Demonstraatio- ympäristö kiertotalouden sivuainevirroille



**XAMK KEHITTÄÄ 229**

KAAKKOIS-SUOMEN AMMATTIKORKEAKOULU  
MIKKELI 2023



Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun ja Metsäsairila Oy:n yhteishankkeissa BioCir – Kiertotalouden sivuainevirrat uusiksi tuotteiksi- ja BioLuuppi – Demonstraatioympäristö kiertotalouden sivuainevirroille -hankkeissa toteutettiin uudenlainen demonstraatioympäristö sekä kehitettiin biokaasulaitosten prosessien optimointia ja lopputuotteiden jatkojalostusta. Hankkeiden päärahoittaja oli Etelä-Savon ELY-keskus Euroopan aluekehitysrahastosta. Hankkeiden toteutusaika oli 1.12.2020–30.11.2023.

---

© Tekijät ja Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu  
Kannen kuva: Manu Eloaho  
Taitto: Grano Oy  
ISBN: 978-952-344-558-1  
ISSN: 2489-3102

[julkaisut@xamk.fi](mailto:julkaisut@xamk.fi)

# LUKIJALLE

BioCir – Kiertotalouden sivuainevirrat uusiksi tuotteiksi- ja BioLuuppi – Demonstraatioympäristö kiertotalouden sivuainevirroille -hankkeiden toteutuksesta vastasivat Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu ja Metsäsairila Oy. Hankkeiden kesto oli 1.12.2020–30.11.2023. Hanketta rahoittivat ja sen pääyhteistyökumppaneita olivat Etelä-Savon ELY-keskus Euroopan aluekehitysrahastosta, Suur-Savon Energiasäätiö sr, BioHauki Oy, Etelä-Savon Energia Oy, BioSairila Oy ja Juvan Bioson Oy.

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulussa hankkeiden projektipäällikönä toimi TkT Hanne Soininen. BioCir-hankkeen Xamkin osiossa työskentelivät projektitutkija Tiina Saario, tutkimusinsinööri Antti Metsälä (1.1.–31.8.2021), projektipäällikkö Salla Pulliainen 1.1.2022 alkaen, tutkimusinsinööri Jussi Konttila (1.1.–31.10.2022), projektitutkija Arttu Lehikoinen 1.12.2022 alkaen ja tutkimusapulainen Minttu Paakkari 22.5.2023 alkaen. Metsäsairila Oy:stä BioCir-hankkeessa työskentelivät osa-aikaisesti projektipäällikkö Aki Heinonen 17.2.2023 saakka, projektiasiantuntija Lauri Turmola (20.2.–10.11.2023), suunnittelija Harri Väisänen (1.7.2022–31.1.2023), projektityöntekijä Olli Siekkinen (vuonna 2022) ja projektityöntekijä Pauliina Alenius (1.2.–15.8.2023).

Hankkeiden vastuullisena johtajana Xamkissa toimi Metsä, ympäristö ja energia vahvuusalan tutkimusjohtaja Lasse Pulkkinen, hankkeen yhteyshenkilönä Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusalan tutkimusryhmäpäällikkö TkT Hanne Soininen ja hankeasiantuntijana Hanna-Maija Penttinen.

Hanketyön etenemistä ohjasi ja valvoi ohjausryhmä, johon kuuluivat: liiketoimintajohtaja Jukka Eestilä Etelä-Savon Energia Oy:stä (ohjausryhmän puheenjohtaja), kehityspäällikkö Jonne Gråsten Metsäsairila Oy:stä, EcoSairilan alueen koordinaattori Panu Jouhkimo Mikkelin kehitysyhtiö Miksei Oy:stä, toimitusjohtaja Ville Kakkonen Metsäsairila Oy:stä, johtava asiantuntija Maarit Kari ProAgrian keskusten liitosta, johtava tutkija, ryhmäpäällikkö Päivi Kurki Luonnonvarakeskuksesta, toimitusjohtaja Mikko Liukkonen BioSairila Oy:stä, rahoitusasiantuntija Esa Pekonen Etelä-Savon ELY-keskuksesta, hallituksen jäsen Kaj Pirinen Suur-Savon Energiasäätiö sr:stä, tutkimusjohtaja Lasse Pulkkinen Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulusta ja hallituksen puheenjohtaja Heikki Teittinen Juvan Bioson Oy:stä. Hankkeen ohjausryhmässä rahoittajan edustajana toimi yritysasiantuntija Jarkko Rautio Etelä-Savon ELY-keskuksesta.

BioCir-hankkeen toteutusta tukemaan perustettiin biokaasutyöryhmä alueen biokaasulaitosten kanssa toukokuussa 2021. Aktiivinen ja kokonaisuutta tukeva työryhmä kokoontui hankkeen toteutuksen aikana yhteensä 14 kertaa.

Hanketoimijat kiittävät hankkeen rahoittajia ja yhteistyökumppaneita, ohjaus- ja työryhmän jäseniä kehittämistyön mahdollistamisesta sekä muita hankkeeseen osallistuneita aktiivisesta osallistumisesta hanketyöhön.

Mikkelissä 30.11.2023

*Tekijät*

# TIIVISTELMÄ

Biokaasulaitokset ovat yleistyneet Suomessa, mutta alalla on edelleen merkittävästi kasvupotentiaalia. Esimerkiksi maatalouden sivuvirtojen ja yhdyskuntien erilliskerättyjen biojätteiden biokaasupotentiaalia on vielä pitkälti hyödyntämättä. Tulevaisuudessa biokaasun tuotantoprosessien on oltava aiempaa energia- ja kustannustehokkaampia. Tuotantoprosessiin vaikuttavat tekijät on tunnistettava ja niitä on pystyttävä hallitsemaan paremmin. Etelä-Savossa on tällä hetkellä neljä biokaasulaitosta: Juvan Bioson Oy, BioSairila Oy:n biojalostamot BioSairila ja BioHauki ja Piekämäen biokaasulaitos.

BioCir – Kiertotalouden sivuainevirrat uusiksi tuotteiksi- ja BioLuuppi – Demonstraatioympäristö kiertotalouden sivuainevirroille -hankkeiden toteutuksesta vastasivat Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu ja Metsäsairila Oy. Xamkin BioLuuppi-investointiosio sisälsi biokaasuprosessin optimointiin ja kehittämiseen tarkoitetun demonstraatiomittakaavan ympäristön perustamisen. Metsäsairila Oy:n BioLuuppi-osiossa hankittiin demonstraatiomittakaavan tuotteistamisympäristö biokaasuprosessin jälkeisten materiaalivirtojen kehittämiseen. BioLuuppi-demonstraatioympäristössä parhaita toimintatapoja voidaan testata hallitusti, jolloin niiden käyttöönotto täyden mittakaavan laitoksissa on riskittömämpää ja kustannustehokkaampaa.

BioCir-hankkeen kehittämistoimenpiteiden aikana selvitettiin muun muassa haitallisten aineiden ja biomuovien käyttäytymistä biokaasuprosessissa sekä selvitettiin niiden vaikutusta kaasuntuotantoon. Toimenpiteiden toteutuksen aikana selvitettiin ja kehitettiin alueen biokaasulaitosten toiminnan ja energiatehokkuuden optimointimahdollisuuksia. Lisäksi tuotettiin uutta tietoa biojalosteiden ja kierrätyslannoitteiden optimoinnista ja kaupallistamispotentiaalista sekä kierrätyslannoitteiden laatuvaatimuksista. Uuden tiedon avulla yritykset voivat tehostaa kierrätyslannoitevalmisteidensa kehitystyötä, mikä edistää kiertotalouden ja ravinteiden kierrätyksen toteutumista Etelä-Savon alueella.

Demonstraatioympäristö kiertotalouden sivuainevirroille -julkaisun artikkeleihin on koostettu tietoa kokonaisuuden toimenpiteiden tuloksista. BioCir- ja BioLuuppi-hankkeiden tulokset ovat hyödynnettävissä alueellisesti Etelä-Savossa ja kansallisesti alan toimijoiden käyttöön. Julkaisun

tulokset tuovat lisätietoa erityisesti biokaasualan toimijoille, maatalousyrittäjille, jätehuolto- ja energia-alan yhtiöille sekä tutkimuslaitoksille.

**Asiasanat:** biokaasu, biotalous, demonstraatiot, kiertotalous, metaani, monitorointi, pilotointi, ympäristöturvallisuus



# ABSTRACT

Biogas plants have become more common in Finland, but the sector still has significant growth potential. For example, the biogas potential of agricultural side streams and separately collected biowaste from communities remains largely unexploited. Biogas production processes must be more energy and cost-efficient in the future. Factors affecting the production process must be identified and managed better. There are currently four biogas plants in Etelä-Savo: Juvan Bioson Ltd, BioSairila Ltd's biorefineries BioSairila and BioHauki and Pieksämäki biogas plant.

The implementation of the BioCir - Material flows of Circular Economy to new products and BioLuuppi - Demonstration Environment for material flows of Circular Economy was carried out by the South-Eastern Finland University of Applied Sciences and Metsäsairila Oy. Xamk's BioLuuppi work package included establishing a demonstration-scale environment for optimising and developing the biogas process. Metsäsairila Ltd's BioLuuppi work package acquired a demonstration-scale productisation environment to develop material flows after the biogas process. In these demonstration environments, different operating methods can be tested in a controlled manner, making their implementation in full-scale plants less risky and more cost-effective.

During the development steps of the BioCir project, the behaviour of harmful substances and bioplastics in the biogas process was investigated, as well as their effect on gas production. During the implementation of the project, possibilities for optimising the operation and energy efficiency of biogas plants in the region were investigated and developed. In addition, new information was produced on the optimisation and commercialisation potential of biorefined and recycled fertilisers and the quality requirements of recycled fertilisers. As a result, companies can improve the development of their recycled fertiliser products, which promotes the realisation of the recycling of circular economy nutrients in the South Savo region.

The Demonstration Environment for material flows of Circular Economy publication contains information on the results of the overall measures. The results of the BioCir and BioLuuppi projects can be utilised regionally in the South Savo region and nationally for industry operators. This

publication is particularly beneficial for operators in the biogas industry, agricultural entrepreneurs, waste management and energy companies, and research institutes.

**Keywords:** bioeconomy, biogas, circular economy, demonstrations, environmental safety, methane, monitoring, piloting

# TEKIJÄT

**JONNE GRÅSTEN**, FM, kehityspäällikkö  
Metsäsairila Oy

**AKI HEINONEN**, DI, projektipäällikkö  
Metsäsairila Oy

**HANNA HÄNNINEN**, insinööri (AMK) opiskelija  
Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu

**VILLE KAKKONEN**, DI, toimitusjohtaja  
Metsäsairila Oy

**JUSSI KONTTILA**, insinööri (AMK), tutkimusinsinööri  
Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu,  
Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusala

**ARTTU LEHIKAINEN**, FM, projektitutkija  
Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu,  
Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusala

**MIKKO LIUKKONEN**, toimitusjohtaja  
BioSairila Oy

**JUHA LUOSTARINEN**, FM, pääsuunnittelija  
Metener Oy

**VUOKKO MALK**, FM, TKI-asiantuntija  
Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu,  
Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusala

**ANTTI METSÄLÄ**, DI, tutkimusinsinööri  
Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu,  
Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusala

**MINTTU PAAKKARI**, insinööri (AMK), tutkimusapulainen  
Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu,  
Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusala

**SALLA PULLIAINEN**, insinööri (AMK), projektipäällikkö  
Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu,  
Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusala

**TIINA SAARIO**, DI, projektitutkija  
Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu,  
Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusala

**JADE SKOG**, insinööri, nuorempi asiantuntija  
Ramboll Finland Oy

**HANNE SOININEN**, TkT, tutkimusryhmäpäällikkö  
Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu,  
Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusala

**KAI SORMUNEN**, FT, johtava asiantuntija  
Ramboll Finland Oy

**HEIKKI TEITTINEN**, hallituksen puheenjohtaja  
Juvan BioSon Oy

**LAURI TURMOLA**, projektiasiantuntija  
Metsäsairila Oy

# SISÄLTÖ

LUKIJALLE .....	5
TIIVISTELMÄ.....	7
ABSTRACT.....	9
TEKIJÄT .....	11
DEMONSTRAATIOYMPÄRISTÖ KIERTOTALOUDEN SIVUAINEVIRROILLE .....	15
Hanne Soininen & Salla Pulliainen & Tiina Saario & Arttu Lehikoinen & Minttu Paakkari & Lauri Turmola & Jonne Gråsten	
BIOLUUPPI – DEMONSTRAATIOYMPÄRISTÖ KIERTOTALOUDEN SIVUAINEVIRROILLE .....	21
Hanne Soininen & Tiina Saario & Salla Pulliainen & Lauri Turmola & Jonne Gråsten & Ville Kakkonen	
BIOKAASULAITOKSEN MONITOROINTI – LAITOKSEN TOIMINTAA OPTIMOIMASSA.....	27
Tiina Saario & Arttu Lehikoinen & Jussi Konttila & Hanne Soininen & Heikki Teittinen & Mikko Liukkonen & Ville Kakkonen & Jonne Gråsten	
BIOKAASUNTUOTANNON OPTIMOINTIA LABORATORIOMITTAKAAVASSA .....	35
Tiina Saario & Hanne Soininen & Aki Heinonen	
MONITOROINTIKOHTTEIDEN JA PILOT-MITTAKAAVAN KOEAJON HAITTA-AINEANALYYSIT .....	50
Arttu Lehikoinen & Tiina Saario & Salla Pulliainen	
SYÖTTEIDEN TUOMAT HAASTEET BIOKAASUPROSESSILLE .....	65
Tiina Saario & Hanne Soininen & Juha Luostarinen & Heikki Teittinen	
BIOKAASULAITOKSILLE TULEVIEN RAAKA-AINEVIRTOJEN SISÄLTÄMÄT HAITALLISET AINEET JA NIIDEN VAIKUTUKSET PROSESSIIN .....	77
Tiina Saario & Antti Metsälä & Hanne Soininen	
BIOHAJOAVAT MUOVIT BIOKAASUPROSESSIN HAASTEENA .....	91
Tiina Saario & Jonne Gråsten	
MÄDÄTEPOHJAISTEN KIERRÄTYSLANNOITTEIDEN VAATIMUKSET .....	101
Arttu Lehikoinen & Salla Pulliainen & Hanna Hänninen	

<b>BIOLUUPPI-DEMONSTRAATIOYMPÄRISTÖN BIOKAASUREAKTOREIDEN KOEAJOT .....</b>	<b>115</b>
Tiina Saario & Arttu Lehikoinen & Jussi Konttila & Hanne Soininen	
<b>BIOJALOSTEIDEN UUDET TUOTEMARKKINAT JA KAUPALLINEN ARVO .....</b>	<b>123</b>
Tiina Saario & Salla Pulliainen & Hanne Soininen & Jonne Gråsten	
<b>BIOKAASUN KESTÄVYYSKRITEERIT .....</b>	<b>135</b>
Salla Pulliainen & Minttu Paakkari	
<b>MÄDÄTEJÄÄNNÖSTEN DEMONSTRAATIOKOKKEET INFRAPUNAKUIVAIMELLA .....</b>	<b>144</b>
Lauri Turmola	
<b>KASVATUKOKEET BIOLUUPISSA VALMISTETUILLE TUOTEAIHIOILLE .....</b>	<b>151</b>
Minttu Paakkari & Lauri Turmola & Hanne Soininen	
<b>BIOLUUPIN TUOTEAIHIOIDEN EKOTOKSISUUS .....</b>	<b>164</b>
Minttu Paakkari & Vuokko Malk	
<b>BIOKAASULAITOSTEN RISKIENHALLINTAA KEHITTÄMÄSSÄ .....</b>	<b>172</b>
Salla Pulliainen & Hanne Soininen & Kai Sormunen & Jade Skog	

# DEMONSTRAATIOYMPÄRISTÖ KIERTOTALOUDEN SIVUAINEVIRROILLE

Hanne Soininen & Salla Pulliainen & Tiina Saario  
& Arttu Lehikoinen & Minttu Paakkari & Lauri Turmola  
& Jonne Gråsten

BioLuuppi-kokonaisuuden tavoitteena oli perustaa uudenlainen demonstraatiomittakaavan tutkimusympäristö Etelä-Savo. Mikkelin EcoSairilaan sijoittuva tutkimusympäristö tuo esiin maakunnan kansallisena kiertotalouden kärkiosaajana ja mahdollistaa kansainvälisen yritysten ja tutkimusverkoston muodostumisen alueelle.

BioCir-kehittämisosion tavoitteena oli lisätä uusien syötteiden käyttöön-ottoa, optimoida alueen orgaanisten materiaalivirtojen biokaasuntuottoa ja tehostaa prosessien energiatehokkuutta. Tavoitteena oli selvittää ja vähentää raaka-aineiden sisältämien haitta-aineiden, esimerkiksi mikro-muovien ja kemikaalien, aiheuttamia riskejä prosessille ja lopputuotteille. Lisäksi tavoitteena oli kehittää uudenlaisia toimintakonsepteja ja tuoteai-hioita nykyisille ja tuleville eteläsavolaisille biokaasulaitoksille.

Laboratoriomittakaavan kokeissa ja BioLuuppi-tutkimusympäristössä kehitettiin ja pilotoitiin käytäntöjä ja menetelmiä, joiden avulla biokaasulaitokset voivat tehostaa energiatehokkuuttaan ja kannattavuuttaan hallitsemalla tuotantoprosessejaan entistä paremmin.

BioCir – Kiertotalouden sivuainevirrat uusiksi tuotteiksi- ja BioLuuppi – Demonstraatioympäristö kiertotalouden sivuainevirroille -hankkeiden toteutuksesta vastasivat Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu ja Metsäsairila Oy. Hankkeiden kesto oli 1.12.2020–30.11.2023. Hanketta rahoittivat ja sen pääyhteistyökumppaneita olivat Etelä-Savon ELY-keskus Euroopan aluekehitysrahastosta, Suur-Savon Energiasäätiö sr, BioHauki Oy, Etelä-Savon Energia Oy, BioSairila Oy ja Juvan Bioson Oy.

## BioCir- ja BioLuuppi-hankkeiden toimenpiteet

Hankkeiden toimenpiteet jakautuivat yhteensä kuuteen työpakettiin:

- TP 1. BioLuuppi – Demonstraatioympäristö kiertotalouden sivuainevirroille
- TP 2. Raaka-ainevirtojen alkuaine- ja haitta-ainepitoisuuksien vaikutus kaasuntuotantoon ja mädätteen laatuun
- TP 3. Biokaasulaitoksen prosessien tehostaminen energiatehokkaammaksi
- TP 4. Biojalosteiden ja kierrätyslannoitteiden uudet tuotekonseptit
- TP 5. Biokaasulaitoksen prosessien riskien ennakoinnin ja omavonnan kehittäminen
- TP 6. Viestintä ja tiedottaminen.

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun työpaketti 1 BioLuuppi-osio sisälsi biokaasuprosessin optimointiin ja kehittämiseen tarkoitetun demonstraatiomittakaavan ympäristön perustamisen. Metsäsairila Oy:n BioLuuppi-osiossa hankittiin demonstraatiomittakaavan tuotteistamisympäristö biokaasuprosessin jälkeisten materiaalivirtojen kehittämiseen.

Työpaketeissa 2–5 toteutettiin BioCir-hankkeen kehittämistoimenpiteitä. Niiden aikana selvitettiin muun muassa haitallisten aineiden, kuten kemikaalien ja lääkejäämien, sekä vierasmateriaalien, kuten biomuovien ja muovien, käyttäytymistä biokaasuprosessissa sekä selvitettiin niiden vaikutusta kaasuntuotantoon. Toimenpiteiden toteutuksen aikana selvitettiin ja kehitettiin alueen biokaasulaitosten toiminnan ja energiatehokkuuden optimointimahdollisuuksista.

Lisäksi tuotettiin uutta tietoa biojalosteiden ja kierrätyslannoitteiden optimoinnista ja kaupallistamispotentiaalista sekä kierrätyslannoitteiden laatuvaatimuksista. Uuden tiedon avulla yritykset voivat tehostaa kierrätyslannoitevalmisteidensa kehitystyötä, mikä edistää kiertotalouden ja ravinteiden kierrätyksen toteutumista Etelä-Savon alueella.

## Ainutlaatuinen kiertotalouden näyteikkuna

Kokonaisuuden tuloksena saatiin Etelä-Savoon merkittävä uusi avaus biokaasualan edistämiseen. Demonstraatioympäristö on ainutlaatuinen kiertotalouden näyteikkuna alueellisesti, kansallisesti ja kansainvä-



lisesti ja toimii jatkossakin merkittävänä testiympäristönä biokaasualan yritysten toiminnan kehittämisessä.

Biocir-hankkeessa toteutettujen laboratorio- ja pilot-mittakaavan kokeiden avulla saatiin tietoa muun muassa alueellisesti uusien raaka-ainevirtojen soveltuvuudesta biokaasuprosessiin. Laajat kirjallisuuteen ja analyyseihin perustuvat mädätteiden ravinne- ja haitta-aineselvitykset antavat arvokasta tietoa biokaasuprosessin lopputuotteiden hyödyntämisestä ja kierrätysravinteiden kehittämisestä. Toimenpiteissä toteutettiin lisäksi tuotteistamiskokeita biokaasuprosessin lopputuotteille sekä kehitettiin laitosten omavalvontaa ja riskienhallintaa. Uutta demonstraatioympäristöä ja hankkeen tuloksia esiteltiin laajasti erilaisissa tilaisuuksissa niin BioLuuppi-ympäristössä kuin erilaisissa sidosryhmätilaisuuksissakin.

## **Biokaasutietoutta maailmalta ja maailmalle**

BioLuuppi aiheutti suurta kiinnostusta eri organisaatioissa, ja sitä esiteltiin useaan otteeseen alueellisille, kansallisille ja kansainvälisille toimijoille. Viralliset avoimet ovet BioLuupilla järjestettiin 6.6.2023, jolloin BioLuupin demonstraatioympäristössä työskentelevät Xamkin ja Metsäsairila Oy:n tutkijat pääsivät esittelemään BioLuupin toimintaa (kuva 1). Lisäksi paikalla olivat laitetoimittaja Metener Oy:n edustajat Juho Tasanen ja Emma Pulkkinen sekä Metsäsairilan BioLuuppi-ympäristöä esittelemässä Nanopar Oy:n edustaja Jaakko Kunttonen. Päivän aikana demonstraatioympäristöön kävi tutustumassa 42 henkilöä.



KUVA 1. BioLuupin avoimet ovet 6.6.2023 (kuva Hanne Soininen).

Myös muut tutkimusyksiköt ovat olleet kiinnostuneita BioLuupista ja sen tarjoamista mahdollisuuksista. Kymmenen hengen seurue Mikkelin yliopistokeskus MUC:sta, Aalto-yliopistosta, Etelä-Savon ammattiopisto Esedusta ja LUT-yliopistolta kävi tutustumassa BioLuupin toimintaan 5.10.2023 (kuva 2). Lisäksi BioLuuppi- ja BioCir-hankkeiden ohjausryhmä vieraili BioLuupilla 7.9.2022 (kuva 3).



KUVA 2. BioLuupin avoimet ovet 5.10.2023 (kuva Salla Pulliainen).



KUVA 3. Ohjausryhmän vierailu 7.9.2022 (kuva Salla Pulliainen).

BioCir-hanke osallistui myös Jyväskylässä 10.–11.5.2023 pidettyyn Yhdyskuntatekniikan näyttelyyn yhteistyössä Blue Economy Mikkeli – vesiosaamisen kansainvälistyminen- ja Devo-hankkeiden kanssa (kuva 4). Kahden päivän aikana messuilla vieraili noin 6 000 kävijää, ja näyttelyssä esiteltiin BioLuuppi-ympäristöä laajalle joukolle alan toimijoita.



KUVA 4. Yhdyskuntatekniikan näyttely Jyväskylässä 10.–11.5.2023 (kuva Tiina Saario).

## Uutta tietoa biokaasualalle

Demonstraatioympäristö kiertotalouden sivuainevirroille -julkaisun artikkeleihin on koostettu uutta tietoa kokonaisuuden toimenpiteiden tuloksista. BioCir- ja BioLuuppi-hankkeiden tulokset ovat hyödynnettävissä alueellisesti Etelä-Savossa ja kansallisesti alan toimijoiden käyttöön. Julkaisun tulokset tuovat lisätietoa erityisesti biokaasualan toimijoille, maatalousyrittäjille, jätehuolto- ja energia-alan yhtiöille ja tutkimuslaitoksille.

# BIOLUUPPI – DEMONSTRAATIO- YMPÄRISTÖ KIERTOTALOUDEN SIVUAINEVIRROILLE

Hanne Soininen & Tiina Saario & Salla Pulliainen  
& Lauri Turmola & Jonne Gråsten & Ville Kakkonen

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun ja Metsäsairila Oy:n yhteisessä BioLuuppi – Demonstraatioympäristö kiertotalouden sivuainevirroille -investointihankkeessa perustettiin uudenlainen demonstraatiomittakaavan tutkimusympäristö Etelä-Savoon. BioLuuppi-tutkimusympäristössä kehitetään ja pilotoidaan käytäntöjä ja menetelmiä, joilla parannetaan biokaasulaitosten energiatehokkuutta ja kannattavuutta hallitsemalla tuotantoprosessia entistä paremmin.

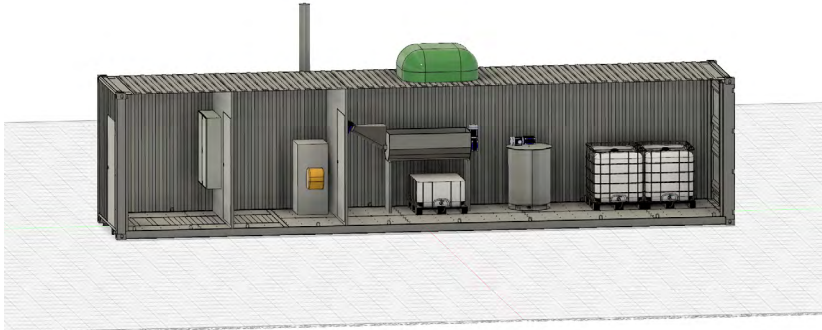
Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun osio sisälsi biokaasuprosessi-investoinnin ja demonstraatiomittakaavan ympäristön perustamisen. Metsäsairila Oy:n osio sisälsi biokaasuprosessin jälkeisten materiaalivirtojen demonstraatiomittakaavan tuotteistamisympäristön. Hankkeen päärahoittaja oli Etelä-Savon ELY-keskus Euroopan aluekehitysrahastosta.

## **Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun BioLuuppi-Demonstraatioympäristö**

Mikkelin Metsäsairilaan valmistui keväällä 2022 Xamkin BioLuuppi – biokaasun tutkimusympäristö. Siellä voidaan toteuttaa erilaisia märkä- ja kuivamenetelmään pohjautuvia biokaasukokeita isommassa mittakaavassa. BioLuupissa uusien syötemateriaalien testaukset onnistuvat hallituissa olosuhteissa vaarantamatta varsinaisen biokaasulaitoksen prosessin toimintaa. (Soininen ym. 2023)

Tutkimusympäristön toimitti laukaalainen Metener Oy, jolla on yli 20 vuoden kokemus sekä pilot- että täydenmittakaavan biokaasulaitosten suunnittelusta, rakentamisesta ja toiminnasta. Tutkimuskontissa on kaksi jatkuvatoimista biokaasureaktoria: kuiva- ja märkäreaktorit. Näiden tilavuudet ovat 500 litraa.

Reaktoreiden tuottama kaasu johdetaan kaasumittareiden ja -varaston kautta kaasukattilaan, joka yhdessä sähkövastuksen kanssa hoitaa reaktoreiden lämmityksen (kuva 1). Reaktoreiden prosesseja ja automaatiota voidaan seurata ja ohjata sekä paikan päällä että etänä Metener Oy:n automaatiojärjestelmän kautta. (Soininen ym. 2023)



KUVA 1. BioLuuppi-ympäristön periaatekuva (Metener Oy).

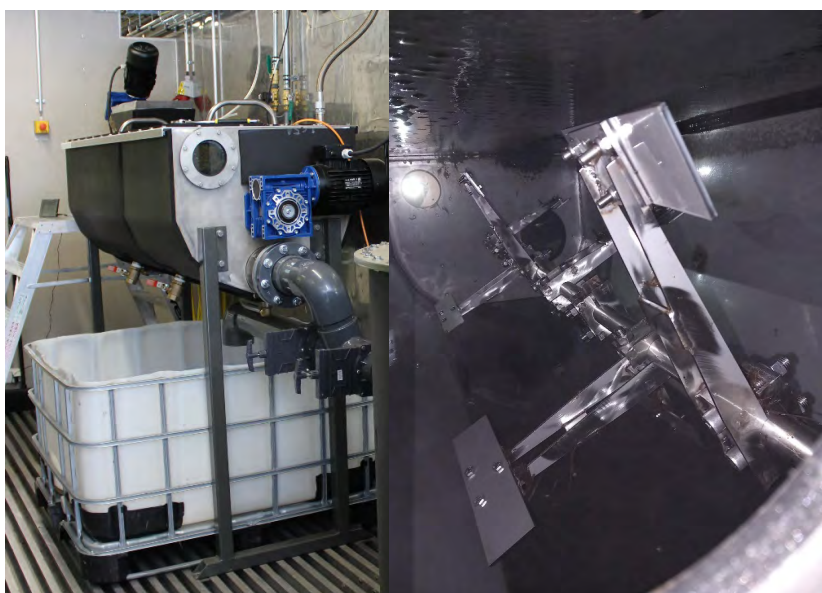
Biokaasudemonstraatioympäristössä käynnistettiin ensimmäinen koeajo kesäkuussa 2022 (kuva 2). BioCir-hankkeen aikana kontissa tehtiin koeajoja yhteistyössä Etelä-Savon alueen biokaasulaitosten Bioson Oy:n ja BioSairila Oy:n (Biohauki ja BioSairila) kanssa.



KUVA 2. Xamkin BioLuuppi-demonstraatioympäristö sijaitsee Metsäsairilan lajittelu- ja kierrätyskeskuksessa (kuva Manu Eloaho).

## Laboratoriomittakaavasta demonstraatiomittakaavan

Aikaisemmin biokaasukokeita on tehty Xamkin Ympäristölaboratoriossa 1–15 litran reaktorikoossa. BioLuuppi mahdollistaa 500 litran reaktorikoon testaukset. BioLuupin kuivareaktori on vaakatasoinen 500 litran puolisynterin mallinen reaktori (kuva 3), jonka keskellä pyörivät mekaaniset sekoituslavat. Reaktorin syöttö tapahtuu syöttöruuvilla, ja se voidaan ohjelmoida syöttämään reaktoria tietyn aikaa 0–3 kertaa vuorokaudessa. Mädätteen poisto tai näytteenotto reaktorista tapahtuu manuaalisesti.



*KUVA 3. Kuivareaktori (vas.) ja kuivareaktorin sekoituslavat (oik.) (kuvat Tiina Saario).*

Märkäreaktori on 500 litran säiliö, jonka keskellä on mekaaninen lapasekoittaja (kuva 4). Tämän lisäksi reaktorin sisällä on pumppu, jota voidaan hyödyntää nestesekoituksessa, näytteenotossa ja reaktorin tyhjennyksessä. Syöttö tapahtuu automaattisesti pumpulla erillisestä syöttösäiliöstä 0–3 kertaa vuorokaudessa, ja samalla syklillä voidaan myös suorittaa reaktorin poistot automaattisesti.



KUVA 4. BioLuupin märkäreaktori (kuva Tiina Saario).

Molempien reaktoreiden lämmitys tapahtuu reaktorin ulkokuoressa olevalla nestevaipalla. Tuotettu biokaasukaasu siirtyy BioLuuppi-kontin katolla olevaan varastosäiliöön, josta se hyödynnetään polttamalla lämmöksi kontin kaasukattilassa.

Reaktoreissa on jatkuva pH-, lämpötila- ja pinnankorkeuden mittaus. Molemmista saadaan otettua mädätenäytteet, jotka voidaan erikseen analysoida laboratoriossa. Tuotetusta kaasusta analysoidaan automaattisesti metaani-, hiilidioksidi- ja rikkivetyypitoisuudet. Kaasulinjoissa on erilliset mittausyhteet, joista voidaan kenttämittareilla määrittää esimerkiksi ammoniakkipitoisuudet.



## Metsäsairilan BioLuuppi-Demonstraatioympäristö

Metsäsairilan BioLuuppi-ympäristössä kokeillaan ja testataan mädätteiden (TS 5–50 %) jatkojalostusta. Kontissa on puumalalaisen Nanopar Oy:n Paskier-prosessiin perustuva infrapunakuivain (kuva 5). Paskier-prosessi on vakuumiavusteinen infrapunateknologia, joka koostuu infrapunakuivaimesta, jauhimesta, sekoittajasta ja granulaattorista. Ympäristön hajukaasuja käsitellään biosuodattimella.



KUVA 5. Metsäsairilan BioLuuppi-ympärisöt (kuva Lauri Turmola).

## BioLuupista uutta kasvua Etelä-Savoon

BioLuuppi-demonstraatioympäristö tarjoaa uudenlaisen mahdollisuuden Etelä-Savon alueen biokaasulaitosten toiminnan kehittämiseen. BioLuupissa testatut käytännöt voidaan siirtää laitosmittakaavaan. Tämä parantaa biokaasulaitosten tehokkuutta ja edistää Etelä-Savon alueen materiaalivirtojen kiertotaloutta. Demonstraatioympäristö on ainutlaatuisen kiertotalouden näyteikkuna alueellisesti, kansallisesti ja kansainvälisesti. (Soininen ym. 2023)

# LÄHTEET

*Soininen, H., Pulliainen, S., Saario, T., Lehtikoinen, A. & Luostarinen, J.* 2023. Kiertotalouden edelläkävijät – BioLuuppi. Xamk Read 1/2023. WWW-dokumentti. Saatavilla: <https://read.xamk.fi/2023/metsa-ymparisto-ja-energia/kiertotalouden-edellakavijat-bioluuppi/> [Viitattu 28.11.2023].

# BIOKAASULAITOKSEN MONITOROINTI – LAITOKSEN TOIMINTAA OPTIMOIMASSA

Tiina Saario & Arttu Lehikoinen & Jussi Konttila  
& Hanne Soininen & Heikki Teittinen & Mikko Liukkonen  
& Ville Kakkonen & Jonne Gråsten

Biokaasulaitosten prosessin seuranta on äärimmäisen tärkeää laitoksen toiminnan kannalta. Jo hyvin yksinkertaiset muutokset prosessiolosuhteissa tai syötteissä voivat pahimmassa tapauksessa kaataa koko reaktorin. Tästä syystä on jo laitoksen suunnitteluvaiheessa tärkeää miettiä, miten esimerkiksi reaktorista voidaan ottaa näytteitä, kuinka monta näytetähdettä on mahdollista saada ja mistä kaikista prosessivaiheista on hyvä tehdä seurantaa.

BioCir-hankkeessa suoritettiin prosessin seurantaa kolmella eteläsavolaisella biokaasulaitoksella, joista yksi pohjautui märkämädätykseen ja kaksi kuivamädätykseen. Monitorointia tehtiin ottamalla reaktoreista mädäntenäytteitä ja tekemällä kaasulinjoista kaasumittauksia.

## **Etelä-Savon alueen biokaasulaitokset**

Juvan Bioson Oy:n biokaasulaitos (kuva 1) on aloittanut toimintansa 2011. Laitoksen biokaasureaktorin toiminta pohjautuu mesofiiliseen märkämenetelmään, ja se on jatkuvatoiminen. Reaktorin syötteet valitaan niin, että sen jäännös soveltuu luomupeltojen lannoitukseen. Pääsyötteinä laitoksella käytetään karjan lietelantaa, kanan kuivalantaa sekä elintarviketeollisuuden sivuainevirtoja. Laitos pystyy käsittelemään syötteitä korkeintaan 19 500 tonnia vuodessa. (Saario ym. 2019, Juvan Bioson Oy 2023) Kaikki biokaasulaitoksen läpi menevä materiaali hygienisoidaan. Biokaasulaitoksen nettoenergiatuotto on vuodessa 2 000 MWh. Tuotettu biokaasu käytetään läheisellä puutarhalla sähkö- ja lämpöenergiana.



KUVA 1. Juvan Bioson Oy:n biokaasulaitos (kuva Hanne Soininen).

Mikkelin Metsäsairilan lajittelu- ja kierrätyskeskuksen alueella sijaitsee vuosien 2020–2021 vaihteessa valmistunut BioSairila Oy:n biojalostamo (kuva 2). Siellä käsitellään kuivamädättämällä Mikkelistä ja sen alueelta kerättyjä biojätteitä, maatalouden ja teollisuuden sivuainevirtoja sekä syntyviä jätevesilietteitä. Biojalostuksen lopputuotteena saadaan liikennepolttoaineeksi jalostettua biometaania sekä lannoite- ja maanparannustuotteita. Pääasiallisina syötteinä laitoksella on jätevesiliete (1 reaktori) ja biojäte (2 reaktoria). Laitoksen vastaanottokapasiteetti on vuodessa 13 000 tonnia biojätettä ja 6 500 tonnia jätevesilietettä. (BioSairilan biojalostamo s.a.) Täydellä kapasiteetilla laitos tuottaa noin 1,5 Mm<sup>3</sup> (1 000 tonnia) liikennebiokaasua, joka vastaa noin 1 000 henkilöauton vuosikulutusta.



KUVA 2. BioSairilan biokaasulaitos ja sen rinnalla toimiva kompostointilaitos (kuva Metsäsairila Oy).

Haukivuorella sijaitsee BioSairila Oy:n toinen biojalostamo Biohauki. Aluksi BioHauki Oy:n nimellä toiminut biojalostamo on ollut toiminnassa vuodesta 2017. Jalostamo koostuu kahdesta kuivamädätykseen pohjautuvasta reaktorista, joita syötetään paikallisten maatalousyrittäjien sivuvirroilla, pääosin lehmän- ja kananlannalla sekä heinällä. Tuotteina syntyy tankkaukseen soveltuvaa biometaania sekä luonnonmukaiseksi lannoitteeksi soveltuvaa mädätettä. Laitoksen vastaanottokapasiteetti on 14 000 tonnia vuodessa, ja siitä se tuottaa 400 000 kiloa kaasua, joka vastaa 400 kaasuhenkilöauton vuotuisia tankkauksia. (Haukivuoren biojalostamo s.a.)

Pieksämäen biokaasulaitos aloitti toimintansa syksyllä 2023. Se käsittelee vuosittain 6 000 tonnia jätevedenpuhdistamon lietteitä. Tuotettu biokaasu käytetään jätevedenpuhdistamon sähkön ja lämmön tuottamiseen ja ylimääräinen energia syötetään sähkö- ja kaukolämpöverkkoon. Täydessä kapasiteetissä laitos pystyy tuottamaan noin 1,8 GWh, joka jakautuu tasan lämmön ja sähkön kesken. (Pieksämäki 2023) Mädätettä on suunniteltu käytettävän metsä- ja peltolannoitteena. Rejektivesi eli mädätysjäännöksestä eronnut lietevesi pyritään kierrättämään takaisin prosessiin. (ELY-keskus 2013)

## Biokaasulaitosten monitorointia

BioCir-hankkeessa seurattiin kolmen hyvin erityyppisen biokaasulaitoksen prosessien tilaa. Laitoksilla käytiin vuosien 2021–2023 aikana muutaman kuukauden välein. Laitosten mädätteistä analysoitiin aina pH, johtokyky sekä Rippleyn menetelmään pohjautuva alkaliteetti (IA/PA-suhde). Lisäksi näytteistä analysoitiin kuiva-aine, orgaanisen aineen pitoisuus sekä orgaanisen aineen pitoisuus kuiva-aineessa. Näiden pohjalta laskettiin mädätteiden hiilipitoisuus kuiva-aineessa. Käytetyt menetelmät on esitetty taulukossa 1.

**TAULUKKO 1.** Biokaasulaitosten mädätteiden analyysimenetelmät

Parametri	Menetelmä/ standardi	Laitteisto	Huomioita
pH	SFS 3021, Veden pH-arvon määrittäminen	pH Meter WTW 3310	Biokaasureaktorin pH tyypillisesti n. 7–8. Hyvin toimivan reaktorin pH pysyy vakiotasolla.
Johtokyky	SFS-EN 27888 Veden laatu, sähkönjohtavuuden määrittäminen		-
Ripleyn alkaliteetti	Perustuu metodiin 3230B, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater	Radiometer PHM 210 pH Meter	Ilmaistaan IA/PA-suhdelukuna, joka kertoo prosessin vakaudesta. Lasketaan: $(TA-PA)/PA=IA/PA$ TA = total alkalinity, lietteen puskurointikyky pH 4,3 asti. PA = partial alkalinity, lietteen puskurointikyky pH 5,75 asti. IA = initial alkalinity Alkaliteetin tulisi olla alle 0,5.
Kuiva-ainepitoisuus (TS) ja orgaaninen aine (VS)	SFS 3008 Veden, lietteen ja sedimentin kuiva-aineen ja hehkutusjäähdyksen määrittäminen	Lämpökaappi WTC Binder ja hehkutusuuni Nabertherm B180	Märkäprosessissa syötteen TS alle 15 %, kuivaprosessissa n. 20–40 %. Mitä korkeampi VS/TS-suhde ja mitä helpommin hajoavaa VS-ainetta on, sitä sopivampi syöte on biokaasuprosessiin.
Hiilipitoisuus kuiva-aineessa	Laskennallinen malli, perustuu metodiin vuonna 1951 kehitettyyn kaavaan (Diaz & Savage 2007)	-	Orgaanisen aineen pitoisuus jaettuna 1,8.

## Mädätteen kemialliset ominaisuudet

Biokaasuprosessien pH-mittaus on yksi perusanalyyseista, joka kertoo prosessin vakavista häiriöistä. Anaerobisella mädätysreaktorilla on hie-man puskurointikykyä, jonka kulutuksen jälkeen pH alkaa muuttumaan. pH-mittaus soveltuu hyvin laitoksen jatkuvatoimiseksi ylläpitomittaukseksi. Optimalue biokaasun tuotantoon on pH 6,5–8. (Lehtomäki ym. 2007; Drog 2013; Kymäläinen & Pakarinen 2015.) Tämä vaihteluväli on vain suuntaa osoittava arvo, sillä anaerobisessa mädätyksessä eri mädätyksen vaiheissa on kullakin vaiheella oma optimi pH-alue vaiheessa toimivan mikrobikannan mukaan. Biokaasureaktorin mikrobikanta voi myös tottua optimista vaihteluvälistä poikkeavaan tasoon.

Biokaasuprosessin voidaan sanoa olevan vakaa IA:PA-suhteen ollessa alle 0,3. Suhteen noustessa korkeammaksi biokaasuprosessi voi olla epävakaa, mutta myös vakaat olosuhteet ovat mahdollisia. Kirjallisuudessa epävakaiden mädätysolosuhteiden IA:PA-suhde vaihtelee, mutta on tyypillisesti 0,5–0,8 tai yli. Suhteen ollessa korkea syöttöä tulee vähentää ja selvittää liian korkean arvon aiheuttaja. (Kymäläinen & Pakarinen 2015, Drog 2013)

Taulukossa 2 on esitetty BioCir-hankkeessa biokaasulaitoksilla tehtyjen mädäteanalyysien tuloksia. Tuloksissa näkyy esimerkiksi korkeita alkaliteettipitoisuuksia, jotka kertovat reaktoriin ylikuormitustilasta. Alkaliteetin määrittämisessä tulee kuitenkin huomioida käytössä olevat syötteet. Esimerkiksi jätevesilietteen sisältämät kemikaalit voivat nostaa alkaliteettiarvoa, vaikka reaktori toimisi muuten täysin normaalisti.

**TAULUKKO 2.** Biokaasulaitosten mädätteiden kemiallisten analyysien vaihteluvälejä BioCir-hankkeen aikana.

Parametri	Laitos 1 märkeä	Laitos 2 kuiva			Laitos 3 kuiva	
		Reaktori 1	Reaktori 2	Reaktori 3	Reaktori 1	Reaktori 2
pH	7,7–8,1	7,5–8,4	7,8–8,2	7,5–8,1	7,5–7,9	7,6–7,9
Johtokyky, mS/cm	11,2–25,4	5,8–22,6	13,2–26,5	7,6–31,3	9,7–19,0	11,6–20,1
IA/PA-luku (alkaliteetti)	0,24–0,42	0,2–2,4	0,3–1,1	0,26–0,84	0,33–0,45	0,32–0,47

## Mädätteen kiintoainepitoisuus ja orgaanisen kuorman seuranta

Biokaasulaitoksen kuiva-aineen (TS) määrä on märkäreaktorissa yleensä alle 11 prosenttia ja kuivareaktorissa yli kymmenen prosenttia prosessityypistä riippuen. Kiintoainemäärän noustessa yli suosituksen voi reaktorin sekoitus esimerkiksi häiriintyä ja ilmentyä muun muassa laskeneena kaasuntuottona.

Orgaanisen aines (VS) kuvaa raaka-aineen sisältämää orgaanista ainesta, josta on mahdollista muodostua biokaasua. Biokaasureaktorissa orgaaninen aines hajoaa ja muuntuu biokaasuksi. Mitä enemmän orgaanista ainesta reaktorissa on, sitä enemmän se kykenee tuottamaan kaasua. Toisaalta liian suuri orgaanisen aineksen määrä reaktorissa voi aiheuttaa anaerobisen mädätyksen vaiheissa painotusta ilmeten rasvahappojen tai ammoniakkin kertymisenä reaktorissa. Nämä kummatkin aiheuttavat muutoksia pH:ssa ja yleisemmin hidastavat tai jopa pysäyttävät kaasuntuotannon, kunnes pH lähtee normalisoitumaan (ts. rasvahappo- tai ammoniakkikertymät vähenevät). (Kymäläinen & Pakarinen 2015)

Biokaasulaitosten mädätteistä BioCir-hankkeen toteutuksen aikana analysoidut kiintoainepitoisuudet näyttävät selvän eron märkä- ja kuivalaitosten välillä (taulukko 3). Laitos kaksi oli hankkeen aikana käynnistysvaiheessa, minkä takia kuiva-ainepitoisuudet olivat normaaliin kuiva-aineprosessitoimintaan nähden alhaisia.

**TAULUKKO 3.** Biokaasulaitosten mädätteiden koostumusanalyysit

Parametri	Laitos 1 märkä	Laitos 2 kuiva			Laitos 3 kuiva	
		Reaktori 1	Reaktori 2	Reaktori 3	Reaktori 1	Reaktori 2
Kuiva-aine TS, %	3,8–6,5	5,6–16,6	3,8–13,1	9,0–13,1	12,5–13,8	12,4–13,8
Orgaaninen aines VS, %	2,5–4,7	2,9–9,5	2,8–9,5	6,9–9,4	10,2–11,4	9,7–11,3
VS%TS, %	64,2–76,4	49,5–63,6	69,4–77,6	66,3–76,8	78,7–83,3	76,7–84,3
Hiilipitoisuus kuiva- aineessa, % *	35,7–42,4	27,5–35,3	38,6–43,1	36,8–42,7	43,7–46,3	42,6–46,8

\* Laskennallinen



# LÄHTEET

*BioSairilan biojalostamo s.a.* BioSairila Oy. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://biosairila.fi/biokaasun-tuotanto/biosairilan-biojalostamo/> [Viitattu 23.11.2023]

*Diaz, L.F. & Savage, G.M. 2007. Factors That Affect the Process.* Teoksessa *Diaz, F.M., de Bertoldi, M., Bidlingmaier, W. & Steintiford, E. (toim.) Compost Sciene and Technology. Waste Management Series 8.* Alan-komaat. 49-66. E-kirja. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/book-series/waste-management-series/vol/8/suppl/C> [Viitattu 23.11.2023].

*Drosg, B. 2013. Process monitoring in biogas plants.* IEA Bioenergy Task 37: Energy from biogas.

*ELY-keskus 2013. Pieksämäen biokaasulaitoshanke ei tarvitse YVA-menettelyä.* Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus Etelä-Savo. WWW-dokumentti. Saatavissa: [https://www.ely-keskus.fi/tiedotearkisto/-/asset\\_publisher/7ROIM7O3Zwq2/content/pieksamaen-biokaasulaitoshanke-ei-tarvitse-yva-menettelya](https://www.ely-keskus.fi/tiedotearkisto/-/asset_publisher/7ROIM7O3Zwq2/content/pieksamaen-biokaasulaitoshanke-ei-tarvitse-yva-menettelya) [Viitattu 23.11.2023].

*Haukivuoren biojalostamo s.a.* BioSairila Oy. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://biosairila.fi/biokaasun-tuotanto/biohauen-biojalostamo/> [Viitattu 23.11.2023]

*Juvan Bioson Oy. 2023. Bioson – Toimivaa kiertotaloutta ja puhdasta energiaa.* WWW-dokumentti. Päivitetty 2023. <https://www.bioson.fi/> [viitattu 23.11.2023]

*Kymäläinen, M. & Pakarinen, O. 2015. Biokaasuteknologia: Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen.* Hämeen ammattikorkeakoulu. PDF-dokumentti. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-951-784-771-1> [Viitattu 20.11.2023]

*Lehtomäki, A., Paavola, T., Luostarinen, S. & Rintala, J. 2007. Biokaasusta energiaa maatalouteen: Raaka-aineet, teknologiat ja lopputuotteet.* Jyväskylän yliopiston bio- ja ympäristötieteiden laitoksen tiedonantoja 85. Jyväskylän yliopisto. PDF-dokumentti. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-951-39-3075-2> [Viitattu 20.11.2023].

*Pieksämäki 2023.* Pieksämäen biokaasulaitoksella tuotetaan jätevedenpuhdistamon lietteestä vihreää energiaa. WWW-dokumentti. Päivitetty 18.9.2023. Saatavissa: <https://www.pieksamaki.fi/pieksamaen-biokaasulaitoksella-tuotetaan-jatevedenpuhdistamon-lietteesta-vihreaa-energiaa/> [Viitattu 23.11.2023].

*Saario, T., Soininen, H., Mörsky, S. & Luostarinen, J. 2019.* Demonstraatiokokeet täysmittakaavan laitoksella ja sekoitusmenetelmät. Teoksessa Soininen, H., Haatanen, N. & Pulkkinen, L. (toim.) Metsä, ympäristö ja energia – Soveltavaa tutkimusta ja tuotekehitystä – Vuosijulkaisu 2019. Xamk kehittää 101. Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, 67–75.

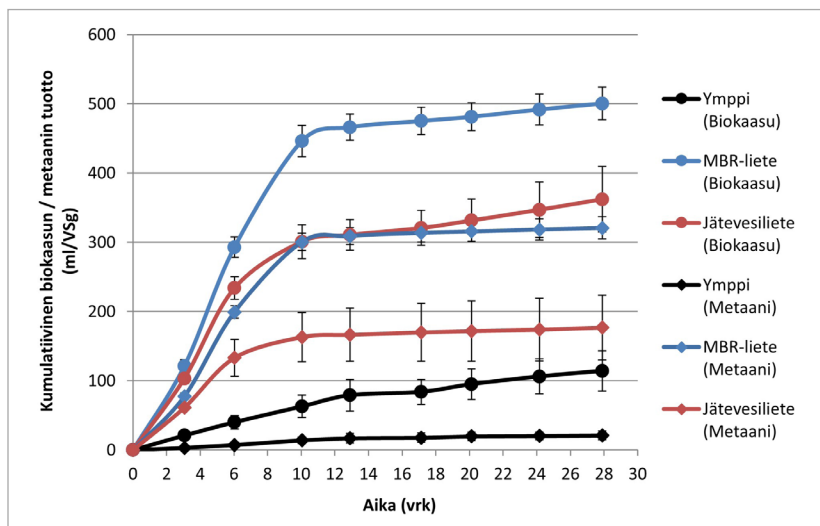
# BIOKAASUNTUOTANNON OPTIMOINTIA LABORATORIOMITTAKAAVASSA

Tiina Saario & Hanne Soininen & Aki Heinonen

Yksi tärkeimmistä biokaasulaitoksen toiminnan optimointimenetelmistä liittyy laitoksen syötemateriaaleihin ja syötemateriaalien reseptointiin. BioCir-hankkeen toteutuksen aikana Xamkin Ympäristölaboratoriossa tehtiin useita laboratorio- ja pilot-mittakaavan biokaasukokeita, joissa testattiin erilaisia syötemateriaaleja. Tässä artikkelissa on esitelty MBR-lietteen ja jätevesilietteen biokaasukokeita. Lisäksi uutena avauksena on testattu reaktorin ylikuormitustilaan puuperäistä biohiiltä ja kokeiltu biojättereaktorin käynnistämistä erilaisilla ympeillä. Artikkelissä sisältyy myös jatkuvatoimisen 15 litran mittakaavan pilot-kokeen, joissa testattiin kuivareaktorin jälkimädätteen käyttämistä märkäreaktorin syötteenä.

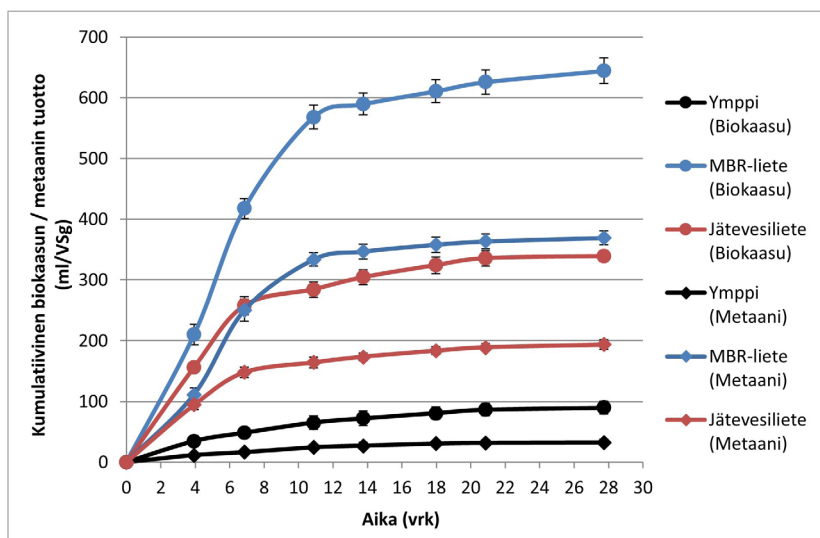
## MBR- ja jätevesilietteen laboriomittakaavan kokeet

BioCir-hankkeen toteutuksen aikana testattiin MBR-lietteen ja perinteisen jätevesilietteen eroja laboratorio- ja pilot-mittakaavan biokaasukokeissa. Panoskokeet toteutettiin Xamkin Ympäristölaboratoriossa kahden litran lasipulloreaktoreissa, joihin lisättiin 750 grammaa märkämädättämön ymppiä käynnistämään biokaasuntuotanto. Reaktoreihin lisättiin MBR-lietettä ja jätevesilietettä siten, että näiden VS-suhde ympin kanssa on noin 1:1. Lisäksi reaktoreihin lisättiin vettä siten, että panoksen kokonaismassaksi tuli 1,5 kg. Reaktorit huuhdeltiin typpikaasulla ja suljettiin kumitulpalla, josta lähti letku kaasupussiin. Letkussa oli lisäksi metaanin määrittystä varten septumilla varustettu metaaniryhde. Reaktorit laitettiin lämpökaappiin 40 °C:n lämpötilaan ja niitä sekoitettiin noin viitenä päivänä viikossa manuaalisesti pyöräyttämällä. Muodostuneen kaasun tilavuus määritettiin vesivaa'alla ja metaanipitoisuus kaasukromatografilla.



KUVA 1. MBR- ja jätevesilietteen metaanin ja biokaasun tuotannot laboratoriomittakaavan panoskokeissa (koesarja 1).

Koesarjan 1 tulosten perusteella MBR-liete toimi paremmin kuin perinteisen prosessin jätevesiliete biokaasureaktorin raaka-aineena (kuva 1). Koesarja toistettiin ja tämän koesarjan 2 tulokset on esitetty kuvassa 2.



KUVA 2. MBR- ja jätevesilietteen metaanin ja biokaasun tuotannot laboratoriomittakaavan panoskokeissa (koesarja 2).

Myös toisessa koesarjassa kaasuntuotannon kannalta MBR-liete toimi syötteenä paremmin kuin perinteisen prosessin jätevesiliete, ja se jopa tuotti lietteen sisältämään orgaaniseen ainekseen verrattuna enemmän

metaania kuin jätevesiliette tuotti biokaasua (kuva 2). Jätevesilietteen metaanintuottopotentiaali oli noin puolet MBR-lietteen metaanintuottopotentiaalista (taulukko 1).

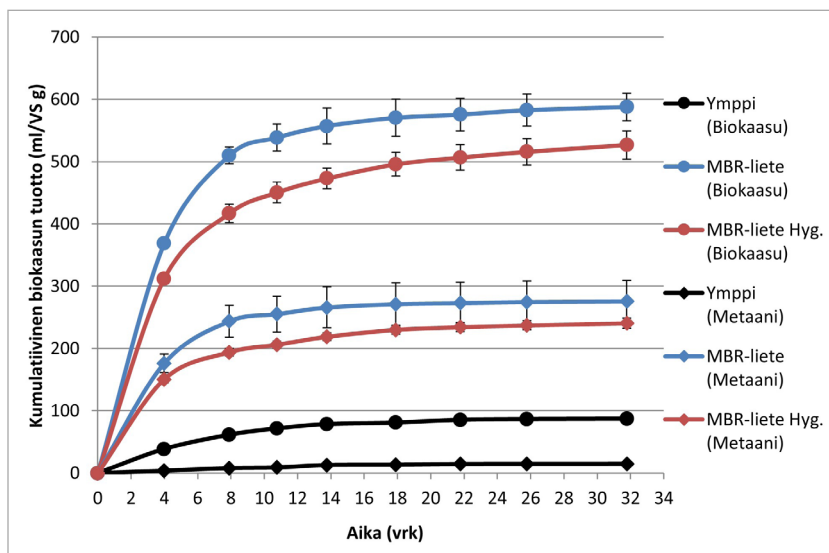
**TAULUKKO 1.** Laboratoriomittakaavan panoskokeissa määritetyt biokaasu- ja metaanintuottopotentiaalit (Luostarinen ym. 2008, Davidson ym. 2007, Einola ym. 2001).

Syöte	Menetelmä	Tuottopotentiaali raaka-aineen org. aineeseen suhteutettuna		Tuottopotentiaali raaka-aineen kokonaismassaan suhteutettuna	
		Biokaasu m <sup>3</sup> BG/ tVS	Metaani m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> / tVS	Biokaasu m <sup>3</sup> BG/ tVS	Metaani m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> / tVS
Jätevesiliette (kuiva-aine 27 %)	Pullokokeet (sarja 1)	239 (194–282)	156 (107–201)	28 (22–33)	18 (12–23)
	Pullokokeet (sarja 2)	237 (227–245)	161 (154–170)	38 (36–39)	26 (25–27)
	Kirjallisuus	-	263–400	-	-
MBR-liete (kuiva-aine 23 %)	Pullokokeet (sarja 1)	377 (350–394)	300 (281–309)	63 (58–66)	50 (47–52)
	Pullokokeet (sarja 2)	531 (509–550)	337 (324–346)	88 (84–91)	56 (54–57)

## Hygienisoinnin vaikutus MBR-lietteen biokaasupotentiaaliin

Xamkin Ympäristölaboratoriossa testattiin kahdessa eri mittakaavassa hygienisoidun ja hygienisoimattoman MBR-lietteen biokaasuntuotantoa. Koelaitteina käytettiin kahden ja viidentoista litran panosreaktoreita. Kokeissa MBR-liete hygienisoitiin 70 asteen lämpötilassa tunnin ajan.

Kuvasta 3 nähdään, että koesarjassa hygienisointi heikensi biokaasuntuotantoa jonkin verran. Ensimmäisen viikon aikana hygienisoimaton MBR-liete tuotti enemmän biokaasua kuin hygienisoitu, mutta tämän jälkeen tilanne tasoittui. Kaasun metaanipitoisuuksissa ei lietteiden välillä ollut eroa, vaan molemmilla kokeen aikana mitatut korkeimmat metaanipitoisuudet olivat noin 56 prosenttia.



KUVA 3. Hygienisoidun ja hygienisoimattoman MBR-lietteen metaanin ja biokaasun tuotannot kahden litran panoskokeissa.

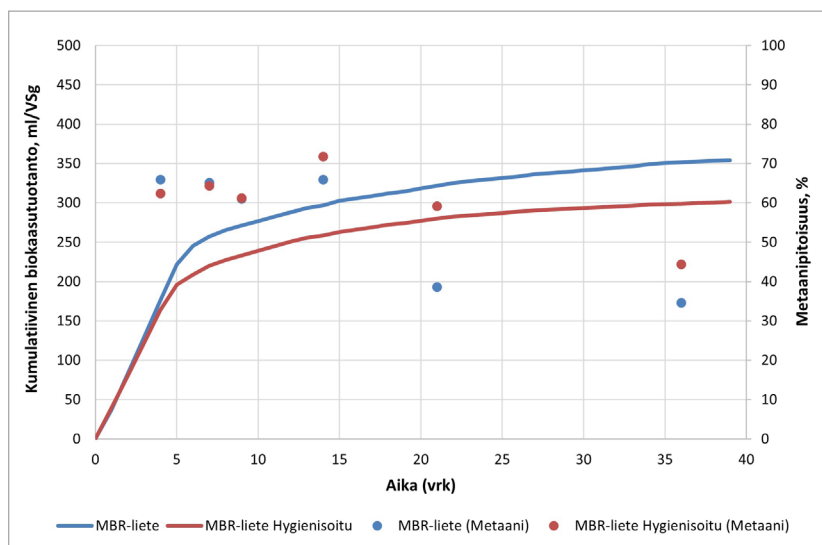
Taulukossa 2 on esitetty syötteiden kaasuntuottopotentialit. Lietteen sisältämään orgaaniseen aineeseen verrattuna hygienisoimaton MBR-liete saavutti edelleen paremman kaasun- ja metaanintuottopotentialin.

**TAULUKKO 2.** Laboratoriomittakaavan panoskokeissa määritetyt biokaasu- ja metaanintuottopotentialit hygienisoidulle ja hygienisoimattomalle MBR-lietteelle (Luostarinen ym. 2008, Davidson ym. 2007, Einola ym. 2001).

Syöte	Menetelmä	Tuottopotentiali raaka-aineen org. aineeseen suhteutettuna	
		Biokaasu m <sup>3</sup> BG/tVS	Metaani m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /tVS
MBR-liete	Pullokokeet	500 (475–529)	261 (244–293)
MBR-liete, hygienisoitu	Pullokokeet	439 (419–464)	226 (219–235)
Jätevesiliete	Kirjallisuus	-	263–400

Xamkin Ympäristölaboratorion 15 litran automaattisiin biokaasureaktoreihin koottiin kymmenen kilon panokset, jotka sisälsivät viisi kiloa ympäriä ja testimateriaalin mukaan joko 1 025 grammaa hygienisoimatonta tai 760 grammaa hygienisoitua MBR-lietettä ja loppumassan vettä. Reaktoreissa oli jatkuva 20–25 rpm:n sekoitus, ja lämpötila oli asetettu +40 °C:seen. Kaasukellot määrittivät reaktoreiden tuottaman biokaasun kokonaismäärän, ja erillisiin kaasupusseihin kerätyistä näytteistä määri-

tettiin metaanipitoisuus joko kaasukromatografilla tai Optima 7 biogas-kenttäanalysaattorilla.



KUVA 4. Hygienisoidun ja hygienisoimattoman MBR-lietteen biokaasuntuotto ja metaanipitoisuudet 15 litran reaktoreissa.

Kuten kahden litran pullokokeissa, myös 15 litran reaktoreilla hygienisoimattoman MBR-liete tuotti enemmän kaasua (kuva 4). Biokaasuntuottopotentiaali oli hygienisoimattomalla lietteellä 354 m<sup>3</sup>/tVS ja hygienisoidulla 301 m<sup>3</sup>/tVS.

Syötteiden C/N-suhde on samalla tasolla, mutta typpipitoisuus on hygienisoimattomalla MBR-lietteellä hieman korkeampi. Todennäköisesti hygienisoinnin aikana liukoista typpeä haihtui ilmaan, mikä on vaikuttanut myös tuloksiin. 15 litran reaktoreiden puretuista mädätteistä analysoitiin typpipitoisuudet ALS Finland Oy:n toimesta (taulukko 3). Tuloksista näkee, että mädätteessä, jossa syötteenä oli hygienisoitu MBR-liete, kaikki typpitulokset ovat hieman pienempiä kuin hygienisoimattoman MBR-lietteen mädätteellä.

**TAULUKKO 3.** Purettujen 15 litran reaktoreiden mädätteiden analyysitulokset (ALS Finland Oy).

Parametri	Yksikkö	Reaktori 1 – MBR-liete	Reaktori 2 – MBR-liete, hygienisoitu
Ammonium	g/kg k.a.	83,2	76,9
Ammoniumtyppi	g/kg k.a.	64,6	59,7
Nitriittityppi	mg/kg k.a.	< 1,70	< 1,65
Nitraattityppi	mg/kg k.a.	< 25,5	< 24,8
Kokonaistyyppi	g/kg k.a.	102	99,8
C/N-suhde	-	3,42	3,44

## Reaktorin ylikuormitustila – testauksessa biohiili

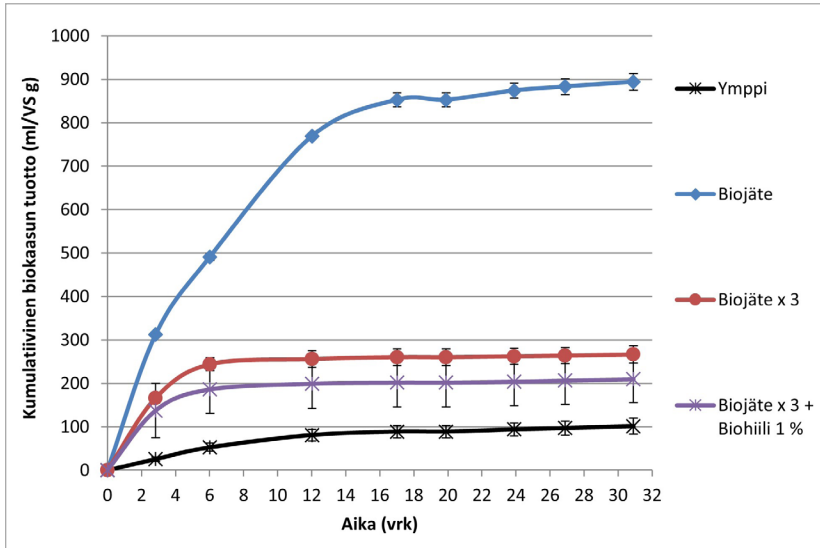
Joskus voi biokaasulaitoksella tulla eteen tilanne, jossa riskinä on reaktorin ylikuormitustila. Tällöin reaktoriin on tarjolla enemmän syötettä kuin mihin se on totunut, ja hallitsemattomana se johtaa reaktorin pH:n nousuun. Jos tilanne jatkuu, voi reaktori ajautua hapoille. Tehokkain hoitokeino on tällöin syötön keskeytys. Aina ei ole mahdollista keskeyttää reaktorin syöttöä. Tästä syystä Xamkin Ympäristölaboratoriossa testattiin, voisiko reaktoriin annosteltu puupohjainen biohiili ehkäistä reaktorin ylikuormitustilaa.

Normaalisti biokaasukokeissa pyritään ympin ja syötemateriaalin VS-määrät suhteuttamaan suhteeseen 1:1, mutta ylikuormituskokeessa kolminkertaistettiin syötemateriaalin määrä. Lisäksi rinnalla testattiin normaalin syötemäärän tuottopotentiaalit. Syötemateriaalina käytettiin ravintolan ruokajätettä, ja biohiilenä oli koivupohjainen biohiili. Biohiilen annostus oli yksi prosentti syötemateriaalin märkämässasta. Tämä pohjautui CityLoops-hankkeessa aiemmin samalle hiilelle määritettyyn optimaaliseen annostukseen (Saario ym. 2023). Biohiilen sisältämää orgaanista massaa ei otettu VS-suhdetta laskiessa huomioon. Muuten koheet toteutettiin kuin edellä.

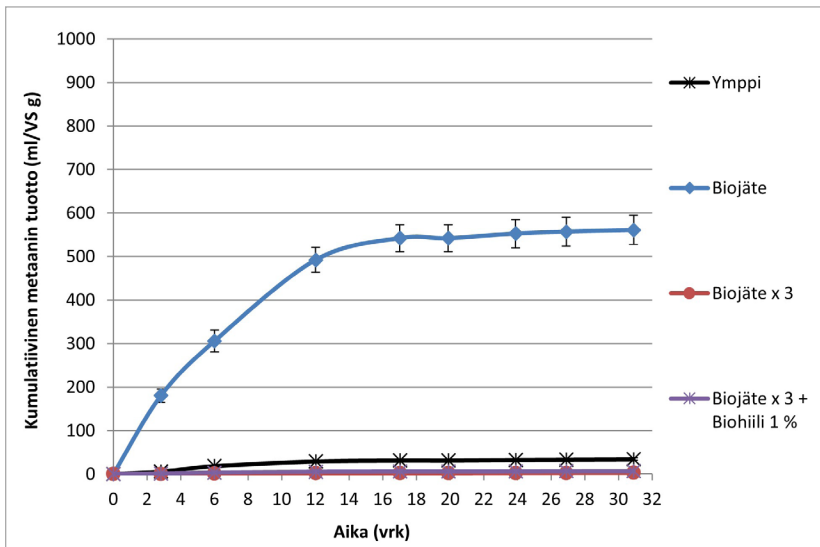
Kolminkertainen syötepanos oli reaktorille selkeästi liikaa (kuvat 5–6). Vaikka reaktorit alkuun tuottivat hieman kaasua, sen metaanipitoisuus nousi parhaimmillaan noin 16 prosenttiin kahden, kolmen viikon kohdalla. Ylikuormitus näkyi myös purettujen reaktoreiden mädätteiden tuloksista. Normaalityyppisellä käynnistetyn biojättereaktorin pH oli 7,7, kun



taas ylikuormitteisten reaktorien pH oli 5,5. Lisäksi reaktorimädäte haisi voimakkaan imelälle. Voidaan todeta syötekuorman vaikutuksen olleen tässä koesarjassa niin voimakas, ettei biohiili pystynyt ehkäisemään reaktorin happotilaa.

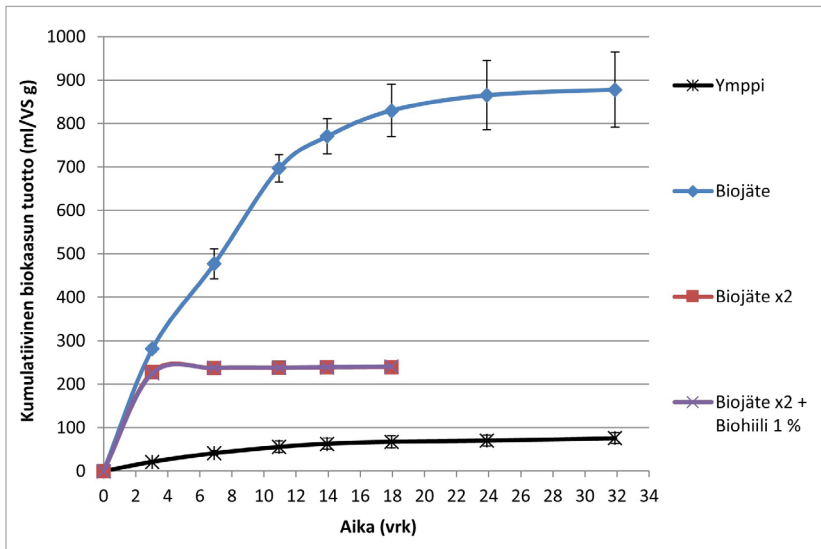


KUVU 5. Kolminkertaisen kuormituksen vaikutus biokaasun tuotantoon.

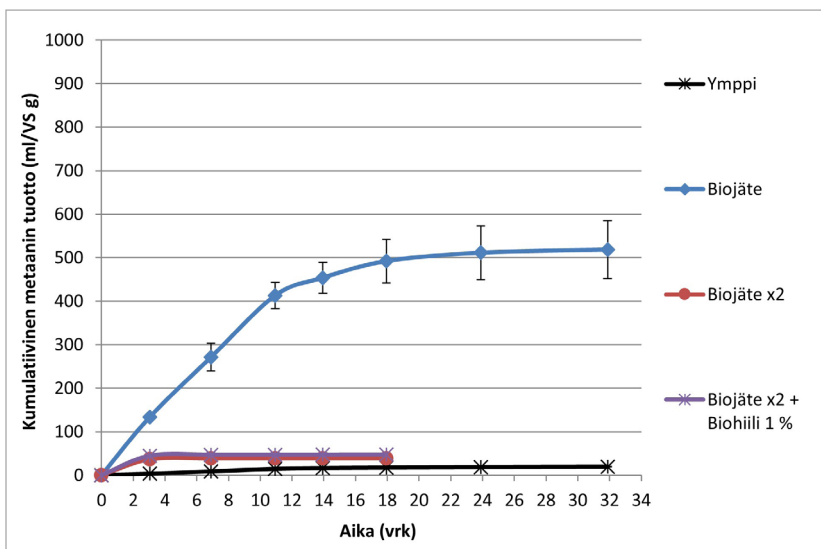


KUVU 6. Kolminkertaisen kuormituksen vaikutus metaanin tuotantoon.

Sama koejärjestely päätettiin toistaa, mutta pienemmällä ylisyötemäärällä. Tässä sarjassa syötemäärä oli vain kaksinkertainen, ja sen tulokset näkyvät kuvissa 7–8. Myös tässä koesarjassa biojäteylikuorma oli turhan suuri reaktorin metanogeneenille, ja reaktorit lopettivat kaasuntuotannon viikon jälkeen. Koska kaksinkertaisen biojättemäärän sisältäneiden reaktoreiden kaasuntuotanto oli selkeästi täysin pysähtynyt, nämä purettiin hieman etuajassa reilun kahden viikon toiminnan jälkeen. Ylikuormitetujen reaktoreiden pH oli 5,5, ja mädäte haisi pistävän imelälle.



KUVA 7. Kaksinkertaisen kuormituksen vaikutus biokaasun tuotantoon.



KUVA 8. Kaksinkertaisen kuormituksen vaikutus metaanin tuotantoon.

Taulukkoon 4 on koottu molempien koesarjojen tuottopotentialit. Vaikka jälkimmäisessä sarjassa reaktorit joutuivat hapoille, kuormitus oli kuitenkin hieman kevyempi. Tämä näkyy tuottopotentiaaleissa, joissa kolminkertainen kuormitus heikensi jopa ympin biokaasuntuottoa: metaanintuottopotentiaali  $-10 \text{ m}^3/\text{tVS}$ , kun taas kaksinkertainen kuormitus tuotti  $27 \text{ m}^3/\text{tVS}$ . Biohiili vielä paransi tuottoa noin 30 prosentilla.

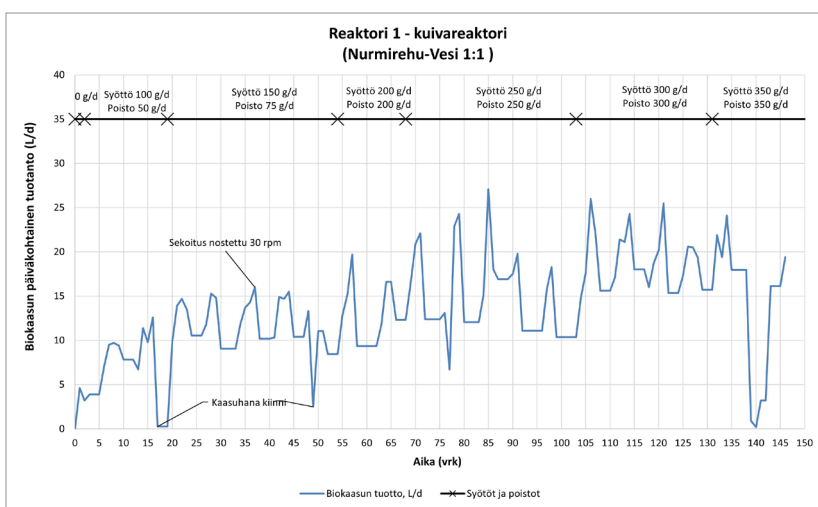
**TAULUKKO 4.** Laboratoriomittakaavan panoskokeissa määritetyt biokaasu- ja metaanintuottopotentialit ylikuormitetuille panoskokeille (<sup>a</sup> Ranta-Korhonen ym. 2018, <sup>b</sup> Achinas & Euverink 2019, <sup>c</sup> Huovari ym. 2008, Lehtomäki ym. 2007).

Syöte	Menetelmä	Tuottopotentiaali raaka-aineen org. aineeseen suhteutettuna		Tuottopotentiaali raaka-aineen kokonaisuudessaan suhteutettuna	
		Biokaasu $\text{m}^3 \text{BG}/\text{tVS}$	Metaani $\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{tVS}$	Biokaasu $\text{m}^3 \text{BG}/\text{tVS}$	Metaani $\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{tVS}$
Biojäte	Pullokokeet (sarja 1)	783 (771–805)	527 (488–547)	178 (175–183)	120 (111–124)
	Pullokokeet (sarja 2)	802 (703–856)	498 (421–541)	191 (168–204)	119 (100–129)
	Kirjallisuus	430–920 <sup>a,b</sup>	450–600 <sup>a,c</sup>	–	–
Biojäte x3	Pullokokeet	177 (158–189)	-10,9 (-11,2...-10,6)	40 (36–43)	-2,5 (-2,5...-2,4)
Biojäte x3 + Biohiili 1 %	Pullokokeet	119 (61–169)	-9,5 (-9,8...-9,1)	27 (14–38)	-2,2 (-2,2...-2,1)
Biojäte x2	Pullokokeet	189 (183–195)	27,2 (20,1–34,4)	45 (44–47)	6,5 (4,5–8,2)
Biojäte x2 + Biohiili 1 %	Pullokokeet	188 (181–199)	35,0 (30,5–39,2)	45 (43–47)	8,3 (7,3–9,3)

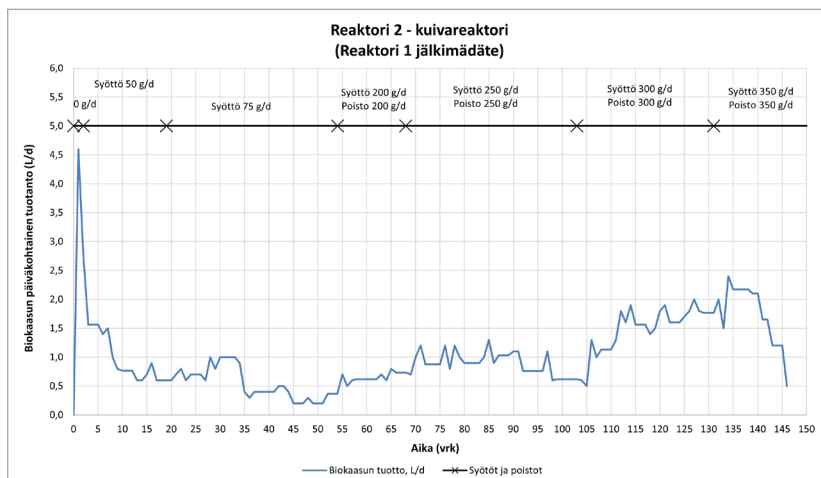
## Kuivareaktorin jälkimädäte märkareaktorin syötteenä

Koska syötemateriaaleista halutaan saada kaikki biokaasupotentiaali irti, mädätteelle voidaan tehdä jälkimädätys. Tämä voidaan toteuttaa esimerkiksi hybridireaktorilla, jossa kuivareaktorin jälkimädätettä käytetään märkareaktorin syötteenä. Tätä testattiin Xamkin Ympäristölaboratoriossa 15 litran jatkuvatoimisilla biokaasureaktoreilla. Reaktor 1 toimi kuivareaktorina, ja sen syötteenä oli massasuhteeltaan 1:1 nurmirehu-vesi-seos, ja reaktor 2 märkareaktorina, ja sen syöte koostui pelkästään kuivareaktorin jälkimädätteestä.

Kokeessa reaktoreihin syötettiin kymmenen kilon aloituspanos. Märkäreaktorin (reaktori 2) aloituspanos koostui kokonaisuudessaan märkämenetelmään pohjautuvan laitoksen ympistä. Kuivareaktorilla (reaktori 1) se koostui kahdeksasta kilosta kuivareaktorin ympistä ja kahdesta kilosta vettä. Vettä jouduttiin käyttämään, jotta saatiin seoksen kuiva-ainepitoisuus paremmin laboratorioreaktoreille soveltuvaksi. Reaktorien lämpötilaksi säädettiin +40 °C, ja kuivareaktorilla oli käytössä jatkuva 20–30 rpm:n sekoitus ja märkäreaktoria sekoitettiin käsin. Kaasun kokonaistuotto määritettiin reaktorikohtaisilla kaasukelloilla ja metaanipitoisuus erikseen kerätyistä kaasunäytteistä kaasukromatografilla.



**KUVA 9.** Jatkuvatoiminen reaktori 1 – syöte nurmirehu-vesi-seos, päiväkohtainen biokaasuntuotanto ja syöttö-/poistojaksot.



*KUVA 10. Jatkuvatoinen reaktori 2 – syöte kuivareaktorin jälkimädäte, päiväkohtainen biokaasuntuotanto ja syöttö-/poistojaksot.*

Reaktorit olivat toiminnassa 146 päivää. Kuvissa 9–10 on esitetty reaktoreiden päiväkohtaiset biokaasuntuotannot sekä syöttö- ja poistomäärät. Kuivareaktori (reaktori 1) tuotti koeajon aikana 1 937 litraa biokaasua eli noin 13 litraa vuorokaudessa. Kaasun metaanipitoisuus oli 46–48 prosenttia. Märkäreaktori (reaktori 2) tuotti jälkimädätteestä vielä 151 litraa kaasua eli noin litran päivässä. Märkäreaktorin tuottaman biokaasun metaanipitoisuus vaihteli enemmän, 33–52 prosenttia. Taulukoissa 5–6 on esitelty tarkemmin kokeen eri vaiheita.

**TAULUKKO 5.** Kuivareaktorin (reaktori 1) koeajovaiheet.

	Vaihe 1 8.-9.2.2023 (0-2 vrk)	Vaihe 2 10.-26.2.2023 (3-19 vrk)	Vaihe 3 27.2.-3.4.2023 (20-54 vrk)	Vaihe 4 3.-17.4.2023 (54-68 vrk)	Vaihe 5 18.4.-22.5.2023 (69-103 vrk)	Vaihe 6 23.5.-19.6.2023 (104-131 vrk)	Vaihe 7 20.6.-4.7.2023 (132-146 vrk)
Syöteseoksen TS %	0	15,7	15,7	15,7	15,7	15,7	15,7
Syöteseoksen VS %	0	14,4	14,4	14,4	14,4	14,4	14,4
Syöttö (g/d, 5d/vko)	0	100	150	200	250	300	350
Syöttö (gVS/d, d/vko)	0	14,4	21,6	28,9	36,1	43,3	50,5
Poisto (g/d, 5d/vko)	0	50	75	200	250	300	350
Kokonaistilavuus (ml)	10 000	10 050- 10 485	10 560- 12 285	12 285	12 285	12 035- 12 285	12 035
HRT	-	201-209	140-164	61	49	40-41	34
Kuormitus OLR (gVS/d/l)	0	1,4	1,8-2,1	2,4	2,9	3,5-3,6	4,2
Biokaasun tuotto (ml/d, keskiarvo)	2 600	7 957	11 418	12 607	14 629	18 484	18 636 *
Biokaasun tuotto (ml/d, vaihteluväli)	0-4 600	3 200- 11 400	8 467- 16 000 *	9 360- 16 600	6 700-27 100	14 800- 26 000	16 133- 24 100 *

**TAULUKKO 6.** Märkäreaktorin (reaktori 2) koeajovaiheet.

	Vaihe 1 8.-9.2.2023 (0-2 vrk)	Vaihe 2 10.-26.2.2023 (3-19 vrk)	Vaihe 3 27.2.-3.4.2023 (20-54 vrk)	Vaihe 4 3.-17.4.2023 (54-68 vrk)	Vaihe 5 18.4.- 22.5.2023 (69-103 vrk)	Vaihe 6 23.5.- 19.6.2023 (104-131 vrk)	Vaihe 7 20.6.-4.7.2023 (132-146 vrk)
Syöteseoksen TS %	0	10,3	7-10,3	7-10,3	7-10,3	7,0	6,7
Syöteseoksen VS %	0	8,1	5,2-8,1	5,2-8,1	5,2-8,1	5,2	5,2
Syöttö (g/d, 5d/vko)	0	50	75	200	250	300	350
Syöttö (gVS/d, d/vko)	0	4,1	6,1	10,4-16,2	16,5	19,8	23,1
Poisto (g/d, 5d/vko)	0	0	0	200	250	300	350
Kokonaistilavuus (ml)	10 000	10 050- 10 615	10 690- 11 760	11 760- 11 950	11 950	11 650- 11 950	11 650
HRT	-	-	-	59	48	39-40	33
Kuormitus OLR (gVS/d/l)	0	0,4	0,4-0,6	1,0-1,6	1,3-2,0	1,7	2,0
Biokaasun tuotto (ml/d, keskiarvo)	2 467	1 036	542	657	894	1 537	1 747
Biokaasun tuotto (ml/d, vaihteluväli)	0-4 600	600 - 1 567	200 - 1 000	500 - 800	620 - 1 300	500 - 2 000	500 - 2 400

Reaktorimädätteiden laatu pysyi koeajon aikana melko tasaisena. Kuivareaktorin (reaktori 1) pH oli noin 7,8 ja märkäreaktorin (reaktori 2) noin 7,9–8,1. Alkaliteetti pysyi märkäreaktorilla 0,27:n tuntumassa, mutta kuivalla alkoi selkeästi kasvava OLR nostaa reaktorin kuormitusta, sillä lopussa alkaliteetti oli jo 0,69. Kuiva-ainepitoisuus oli kuivareaktorilla alussa noin kymmenen prosenttia, ja se laski 6,7 prosenttiin. Märkäreaktorin kuiva-ainepitoisuus vaihteli 3,9–4,7 prosenttiin.

Kuivareaktori ei pystynyt hyödyntämään materiaalin koko potentiaalia, vaan sen mädäte tuotti kaasua vielä reaktorista poiston jälkeen. Tämän perusteella jälkimädätys märkäreaktorissa voi olla hyvä tapa hyödyntää materiaalin koko tuottopotentiaali. Joillakin märkämenetelmään pohjautuvilla laitoksilla onkin jo käytössä jälkimädätysallas.

## LÄHTEET

*Achinas, S. & Euverink, G. J. W.* 2019. Elevated biogas production from the anaerobic co-digestation of farmhouse waste: Insight into the process performance and kinetics. *Waste management* 12, 1240–1249. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://doi.org/10.1177/0734242X19873383> [Viitattu 13.11.2023].

*Davidsson, Å., Lövestedt, C., la Cour Jansen, J., Gruvberger, C. & Aspegren, H.* 2007. Co-digestion of grease trap sludge and sewage sludge. *Waste Management* 6, 986–992. PDF-dokumentti. Saatavissa <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.03.024> [Viitattu 13.11.2023]

*Einola, J.-K., Luostarinen, S., Salminen, E. & Rintala, J.* 2001. Screening for an optimal combination of municipal and industrial wastes and sludges for anaerobic co-digestion. Proceedings of 9th World Congress on Anaerobic Digestion, Part 1. 357–362.

*Huovari, N., Rautanen, J. & Wihersaari, M.* 2008. Biokaasulaitosten energiatase maatilojen biomassoissa hyödyntävissä laitoksissa. Motiva Oy. PDF-dokumentti. Saatavissa: [https://www.motiva.fi/files/4005/Biokaasulaitosten\\_energiatase\\_maatilojen\\_biomassoissa\\_hyodyntavissa\\_laitoksissa.pdf](https://www.motiva.fi/files/4005/Biokaasulaitosten_energiatase_maatilojen_biomassoissa_hyodyntavissa_laitoksissa.pdf) [Viitattu 13.11.2023]

*Lehtomäki, A.* 2006. Biogas production from energy crops and crop residues. Jyväskylän yliopisto. Bio- ja ympäristötieteiden laitos. Väitöskirja. Jyväskylä Studiens in Biological and Environmental Science 163. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://jyx.jyu.fi/bitstream/handle/123456789/13152/9513925595.pdf> [viitattu 13.11.2023]

*Luostarinen, S., Luste, S. & Sillanpää, M.* 2008. Increased biogas production at wastewater treatment plants through co-digestion of sewage sludge with grease trap sludge from a meat-processing plant. *Bioresource Technology* 1. 79–85. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.06.029> [viitattu 13.11.2023]



*Ranta-Korhonen, T., Soininen, H., Saario, T. & Särkkä, H.* 2018. Lääke- ja kemikaalijäämien vaikutus biokaasuntuotantoon. Teoksessa Soininen H., Haatanen, N. & Pulkkinen, L. (toim.) *Metsä, ympäristö ja energia – Soveltavaa tutkimusta ja tuotekehitystä – Vuosijulkaisu 2018*. Xamk kehittää 61. Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, 43–54.

*Saario, T., Malk, V., Soininen, H. & Jafari, S.* 2023. Biojätteen laadun ja käsittelyn vaikutus biokaasulaitoksen optimoinnissa. Teoksessa Soininen, H. & Malk, V. (toim.) *Cityloops – kiertotaloutta edistämässä kansainvälisesti*. Xamk kehittää 221. Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, 62–78. PDF-dokumentti. Saatavissa <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-344-541-3> [viitattu 13.11.2023]

# MONITOROINTIKOhteiden ja PILOT-MITTAKAAVAN KOEAJON HAITTA-AINEANALYYSIT

Arttu Lehikoinen & Tiina Saario & Salla Pulliainen

Mädäte on biokaasureaktorien tuottamaa ravinnerikasta materiaalia, joka voi sisältää erilaisia jatkokäytön kannalta haitalliseksi luokiteltavia aineita. Se voi soveltua esimerkiksi lannoitekäyttöön, jos mädätteestä ja -lostettu lannoite alittaa sille asetetut raja-arvot ja rajoitukset. BioCir-hankkeessa teetettiin laajat haitta-aineanalyytit erilaisista mädäthenäytteistä ALS Finland Oy:llä. Tähän artikkeliin on koostettu tärkeimmät mädätepohjaisten materiaalien lannoitekäyttöön liittyvät yhteiset raja-arvolliset haitta-aineet ja vertailtu niitä näytteistä saatuihin tuloksiin.

## Lannoitelainsäädännön raja-arvot

Riippuen lannoitetuotteen halutusta markkina-alueesta lannoitteita rajoittaa ensisijaisesti EU:n ja Suomen kansallinen lainsäädäntö. Jos lannoitetuotteelle ei haeta CE-merkintää, riittää, että Suomessa markkinoitavat tuotteet täyttävät lannoitelain (maa- ja metsätalousministeriön asetus lannoitevalmisteista 964/2023) mukaiset ainesosaluokkien ja tuoteluokkien vaatimukset. Mädätepohjaisille lannoitteille on Suomessa kaksi ainesosaluokkaa riippuen siitä, sisältääkö tuote yhtään jätevesilietettä. Ainesosaluokat ovat mädäte (ainesosaluokka 4) ja jätevesiliete (ainesosaluokka 10). Jätevesilietteenä katsotaan yhdyskuntajätevesi- ja muut jätevedenpuhdistamolietteen, kuivakäymäläjätteet, saostus- ja umpisäiliölietteet sekä kiinteistö- tai maatilakohtaiset jätevedenkäsittelyjärjestelmän lietteet. (Ruokavirasto a. 2023) Huomioitavaa ainesosaluokista on esimerkiksi hygieenisyyden vaatimukset, kiinteiden epäpuhtauksien rajoitukset sekä stabiilisuuskriteerit ennen markkinointia.

Jos tuotteella on CE-merkintä, sen pitää lisäksi läpäistä EU-lannoitevalmistusasetuksen (2019/1009) (Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EU) 2019/1009) mukaiset ainesosaluokkien sekä tuoteluokkien vaatimukset. Nämä vaatimukset riippuvat lannoitteen ja mädätteen tyypis-

tä, mutta esimerkiksi mädätejäännöspohjaisista lannoitteista valvotaan metallien pitoisuuksia ja polysyklisiä aromaattisia hiilivetyjä (PAH<sub>16</sub>). Lisäksi tuhkista ja biohiilestä valvotaan dioksiineja ja furaaneja (PCDD/PCDF-yhdisteet).

Suomen ja EU:n alueen lannoitetuotteita yhdistävät osittain seuraavat haitta-aineet: metallit, taudinaiheuttajat, kiinteät epäpuhtaudet ja kadmium suhteutettuna fosforiin. Kullekin ainesosa- ja tuoteluokalle voi olla omia lisävaatimuksia, jotka tulee tarkastaa lannoitevalmisteen mukaisen markkina-alueen lainsäädännöstä. Suurin osa Suomen alueella markkinoitavien lannoitetuotteiden haitta-aineiden raja-arvoista joko vastaa CE-merkityille tuotteille määritettyjä arvoja tai on jopa tiukempia. Tämän takia CE-merkittyjen tuotteiden haitta-ainerajoja ei tarkastella erikseen. Kuitenkin tulee huomioida, että rajoitukset pysyville orgaanisille yhdisteille sekä osa kiinteiden epäpuhtauksien rajoista ovat tiukempia CE-merkityissä tuotteissa. Jos lannoitevalmisteen haluaa saada CE-merkityksi, tulee tarkat raja-arvot tarkastaa EU-lannoitevalmistesasetuksesta (2019/1009). Yhteenveto Suomen alueen lannoitteiden haitta-aineiden raja-arvoista on esitetty taulukossa 1.

**TAULUKKO 1.** Lannoitteiden kansalliset tuoteluokkakohtaiset metallipitoisuuksien ja taudinaiheuttajien raja-arvot (maa- ja metsätalousministeriön asetus lannoitevalmisteista 964/2023, Ruokavirasto b. 2023).

Kategoria	Haitta- aine	Orgaa- ninen lannoite	Orgaani- nen ki- vennäis- lannoite	Epäorg. pää- ravinne- lannoite	Epäorg. hiven- ravinne- lannoite	Metsä- tuhka- lannoite	Kalkitus- aine	Maan- parannus- aine (org.)	Maan- parannus- aine (epä- org.)	Kasvu- alusta	Biostimu- lantti
Metallit (mg/kg k.a.)	Arseeni (As)	40	40	40	60	40	40	40	40	10	40
	Elohopea (Hg)	1	1	1	20	1	1	1	1	0,5	1
	Kadmium (Cd) <sup>1</sup>	1,5	1,5	1,5	3	25	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5
	Kromi (Cr)	300	300	300	600	300	400	300	300	200	300
	Kupari (Cu)	600	600	600	600	600	600	600	600	150	300
	Lyijy (Pb)	100	100	100	200	150	100	100	100	50	100
	Nikkeli (Ni)	70	70	70	150	120	70	70	70	50	70
	Sinkki (Zn)	1500	1500	1500	1500	4500 <sup>2</sup>	1500	1500	1500	1500	300
Taudin- aiheuttajat	Salmonella	Neg.	Neg.	Neg.				Neg.	Neg.	Neg.	
	E. coli	1000 pmy/lg tai 1 ml	1000 pmy/lg tai 1 ml	1000 pmy/lg tai 1 ml				1000 pmy/lg tai 1 ml	1000 pmy/lg tai 1 ml	1000 pmy/lg tai 1 ml	
	Enterokokit	1000 pmy/lg tai 1 ml	1000 pmy/lg tai 1 ml	1000 pmy/lg tai 1 ml				1000 pmy/lg tai 1 ml	1000 pmy/lg tai 1 ml	1000 pmy/lg tai 1 ml	

<sup>1</sup>Kadmiumin määrä fosforiin on rajoitettu 50 mg:n fosforikiloa kohti, kun lannoitteessa on yli 2,2 massaprosenttia fosforia (5 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>).

<sup>2</sup>Sinkin enimmäismäärä voi ylittyä 6 000 mg:aan/kg k.a. asti, jos sinkin puute on todettu kasvustosta maaperä-, neulas- tai lehtianalyysillä.

## Näytteiden analyysit

BioCir-hankkeen näytteille teetettiin analyysit sekä jatkokäytön että prosessihaittojen kannalta arvioituna. Yhteensä määritettäviä parametrejä kullekin näytteelle oli 170. Koska mädäte materiaalina luo haasteita analyysien teossa, kaikista näytteistä ei pystytty tekemään kaikkia analyysijä esimerkiksi näytteen tumman värin takia. Tilatut analyysit sisälsivät:

- mikrobiologiset haitta-aineet
- fysikaaliset ominaisuudet
- epäorgaaniset lannoitearvot
- orgaanisten happojen määrä
- raskasmetallipitoisuudet
- PFOS/PFOA-, AOX-, PAH<sub>16</sub>-, PCB-, alkyylifenolien, PCDD- ja PCDF- (dioksiinit ja furaanit) pitoisuudet
- yleisten ftalaattien pitoisuudet.

Analyyseja tehtiin täyden mittakaavan märkä- ja kuivamädätykseen pohjautuvien laitosten mädätteistä. Lisäksi analysoitiin hankkeessa rakennetun demonstraatioympäristö BioLuupin reaktorien mädäthenäytteitä. Haitta-aineiden analyysimenetelmät olivat tyypistetyksi seuraavat: metallit (ICP-AES), taudinaiheuttajat (bakteeriviljely), PAH<sub>16</sub>-yhdisteet (HRGC-HRMS) ja PCDD/F-yhdisteet (GCMS tai MS/MS).

## MBR-lietteen haitta-aineet biokaasuprosessissa

Jätevedenpuhdistamolta muodostuvaa MBR-lietettä käytettiin BioCir-hankkeen laboratorio- ja pilot-mittakaavan kokeissa Xamkin ympäristölaboratoriossa sekä BioLuuppi-demonstraatioympäristössä toteutetuissa kokeissa. Lisäksi sitä käytetään täyden mittakaavan kuivamädätykseen perustuvan biokaasulaitoksen syötteenä. Lietteestä analysoitiin lannoitevalmisteita rajoittavat haitta-ainepitoisuudet, jotka on esitetty taulukossa 2.

**TAULUKKO 2.** MBR-lietteen haitta-ainepitoisuudet (ALS Finland Oy).

Kategoria	Haitta-aine	MBR-liete 23.5.2023
Metallit	Arseeni (As)	0,86 mg/kg k.a.
	Elohopea (Hg)	0,34 mg/kg k.a.
	Kromi (Cr)	18,4 mg/kg k.a.
	Kupari (Cu)	134 mg/kg k.a.
	Lyijy (Pb)	5,6 mg/kg k.a.
	Nikkeli (Ni)	16,5 mg/kg k.a.
	Sinkki (Zn)	331 mg/kg k.a.
Taudinaiheuttajat	Salmonella	Negatiivinen / 25 g
	E. coli	20 pmy/g
	Enterokokit	348 000 pmy/g k.a.
POP-yhdisteitä	PAH <sub>16</sub>	< 1,89 mg/kg k.a.
	PCDD/F-yhdisteet	0,8–19 ng/kg k.a.

Lietteen metallipitoisuudet olivat muutoin raja-arvojen mukaiset, mutta sinkin pitoisuus ylitti lannoitelainsäädännössä kasvualustalle määrätyn maksimiraja-arvon (300 mg/kg k.a.). Lisäksi MBR-lietteen enterokokkien määrät ylittivät epäorgaanisen pääravinnelannoitteen, orgaanisen sekä epäorgaanisen maanparannusaineen ja kasvualustan korkeimman sallitun pitoisuuden (1000 pmy/g). PAH-, dioksiini- ja furaanipitoisuudet olivat alle raja-arvojen.

MBR-lietteen sekä muiden jätevesipohjaisten mädätteiden markkinointi tapahtuu kansallisilla lannoitetuotteilla ainesosaluokan 10 rajoitusten mukaisesti.

## Demonstraatiomittakaava – BioLuupin märkäreaktori

Xamkin BioLuuppi-tutkimusympäristön märkäreaktorin tilavuus on 500 litraa. Koeajo käynnistettiin helmikuussa 2023 märkäreaktorin mädätteellä. Toukokuuhun asti reaktorin syötteenä oli käytetty melassivesiseosta ja tämän jälkeen sen syötteenä vaihdettiin laimennettu, hygienisoimaton MBR-liete (1:3 massasuhde, orgaanisen aineen pitoisuus VS 4,4 %). Ennen syötteen vaihtoa reaktorista otettiin näyte 23.5.2023. Toinen näyte reaktorista otettiin sen purun yhteydessä heinäkuussa 2023. Näillä näytteillä ja haitta-aineiden analyyseillä pyrittiin saamaan tietoa jätevesiliet-

teen vaikutuksesta biokaasumädätteen laatuun ja biokaasuprosessiin. Näytteiden tulokset on esitetty taulukossa 3.

**TAULUKKO 3.** BioLuupin märkäreaktorin lannoitekäytössä rajoitettujen haitta-aineiden muutokset 23.5.–5.7.2023 (ALS Finland).

Kategoria	Haitta-aine	BioLuuppi märkäreaktori ennen MBR-lietettä 23.5.2023	BioLuupin märkäreaktorin mädätteen lannoitekäytössä 5.7.2023
Metallit (mg/kg k.a.)	Arseeni (As)	< 1,9	< 5,96
	Elohopea (Hg)	< 0,76	< 2,38
	Kromi (Cr)	9,21	< 5,96
	Kupari (Cu)	23,4	19,8
	Lyijy (Pb)	< 2,0	< 6,3
	Nikkeli (Ni)	8,2	< 11,9
	Sinkki (Zn)	134	85,4
Taudin-aiheuttajat	Salmonella	negatiivinen/25 g	negatiivinen/25 g
	E. coli	< 10 pmy/g	< 10 pmy/g
	Enterokokit	52 300 000 pmy/g k.a.	70 900 pmy/g k.a.
POP-yhdisteitä	PAH <sub>16</sub>	< 3,04 µg/l *	2,37 µg/l
	PCDD/F-yhdisteet	0–20 ng/kg	0–5 ng/kg

\* määritetty uutteesta

Reaktorin molempien näytteiden metallipitoisuudet olivat muuten lannoitelainsäädännön määrittämässä rajoissa, mutta elohopeapitoisuus rajoittaa sitä, mihin tuotteisiin mädätettä voidaan käyttää. Ensimmäinen näyte soveltuu elohopeapitoisuuden perusteella kaikkiin muihin käyttökohteisiin paitsi kasvualustaksi (alle 0,5 mg/kg k.a.), ja jälkimmäinen näyte soveltuu ainoastaan epäorgaanisen hivenravinnelannoitteen materiaaliksi. Syötteenä käytetyn MBR-lietteen sisältämä elohopea on mahdollisesti lähtenyt kumuloitumaan reaktorissa eikä ole poistunut poistomädätteen mukana ja näin ollen nostanut elohopeapitoisuuksia kokeen aikana.

Salmonella ja *e. coli* alittivat määrittämissä rajoissa molemmissa näytteissä. Enterokokkien määrä oli liian korkea kummassakin näytteessä lannoite-tuotteille, mutta tämä voitaneen ratkaista mädätteen jälkihygienisoinnilla. PAH<sub>16</sub>-yhdisteiden määrä alitti raja-arvon, kuten myös dioksiinien ja fu-raanien määrät.

## Täysmittakaavan biokaasureaktori – jätevesilietesyötteinen kuivareaktori

Hankkeen kokeissa testattua MBR-lietettä käytetään täyden mittakaavan laitoksen syötteenä. Liette hygienisoidaan ennen biokaasureaktoriin syötöä, jolloin lietteen sisältämät taudinaiheuttajat tuhoutuvat. BioCir-hankkeessa reaktorin poistomädätteen näytteestä analysoidut tulokset on esitetty taulukossa 4.

**TAULUKKO 4.** MBR-lietteellä syötetyn täysmittakaavan kuivamädätyspohjaisen laitosreaktorin mädätteen haitta-ainepitoisuudet (ALS Finland Oy).

Kategoria	Haitta-aine	Laitosmittakaavaan kuivareaktori 27.6.2023
Metallit (mg/kg k.a.)	Arseeni (As)	2,1
	Elohopea (Hg)	< 0,20
	Kromi (Cr)	28,2
	Kupari (Cu)	265
	Lyijy (Pb)	9,3
	Nikkeli (Ni)	24,6
	Sinkki (Zn)	468
Taudinaiheuttajat	Salmonella	negatiivinen /25 g
	E. coli	< 10 pmy/g
	Enterokokit	< 50 pmy/g k.a.
POP-yhdisteitä	PAH <sub>16</sub>	0,236 mg/kg k.a.
	PCDD/F-yhdisteet	0–17 ng/kg k.a.

Kuparin ja sinkin määrät jätevesireaktorin näytteessä olivat liian korkeat, jotta sitä voisi käyttää kasvualustan raaka-aineena. Hygienisointi toimii laitoksella oikealla tavalla, eli jätevesireaktorin mädäte alitti kaikki taudinaiheuttajille asetetut raja-arvot. PAH-, furaani- sekä dioksiiniyhdisteiden osalta kumpikin näyte alitti raja-arvot.



## MBR-lietteen hygienisoinnin vaikutus – laboratoriopilot-mittakaavassa

Xamkin Ympäristölaboratoriossa testattiin kahdella 15 litran pilot-mittakaavan reaktorilla hygienisoidun ja hygienisoimattoman MBR-lietteen biokaasun ja metaanin tuottopotentiaaleja. Kokeita varten toisen reaktorin liete hygienisoitiin 70 asteen lämpötilassa tunnin ajan. Reaktoreihin syötettiin noin 170 grammaa orgaanista kuormaa vastaava määrä MBR-lietettä ja reaktoreiden annettiin toimia niin kauan kuin ne tuottivat kaasua. Testireaktoreiden puretuista mädätteistä analysoitiin ALS Finland Oy:n toimesta haitta-ainepitoisuudet, jotka on esitetty taulukossa 5.

**TAULUKKO 5.** Laboratorio-pilot-mittakaavan reaktoreiden mädätteiden lannoitekäytössä rajoitettujen haitta-aineiden pitoisuudet (ALS Finland Oy).

Kategoria	Haitta-aine	Hygienisoimaton MBR-mädäte	Hygienisoitu MBR-mädäte
Metallit (mg/kg k.a.)	Arseeni (As)	1,08	0,92
	Elohopea (Hg)	< 0,20	< 0,20
	Kromi (Cr)	26,2	15,3
	Kupari (Cu)	142	130
	Lyijy (Pb)	5,7	5,1
	Nikkeli (Ni)	16,1	11,2
	Sinkki (Zn)	381	358
Taudin-aiheuttajat	Salmonella	negatiivinen/25 g	negatiivinen/25 g
	E. coli	< 10 pmy/g	< 10 pmy/g
	Enterokokit	< 50 pmy/g k.a.	< 50 pmy/g k.a.
POP-yhdisteitä	PAH <sub>16</sub>	3,05 mg/kg k.a.	< 1,68 mg/kg k.a.
	PCDD/F-yhdisteet	0–14 ng/kg k.a.	0–14 ng/kg k.a.

Hygienisoidussa MBR-mädätteessä kaikki taulukon 5 metallien arvot olivat hieman pienempiä kuin hygienisoimattomassa MBR-mädätteessä. Tämä näkyi myös 15 muussa näytteistä analysoidussa metallissa. Hygienisointi itsestään ei liene metallipitoisuuksia muuttanut, vaan ero johtuu reaktoreihin syötetystä lietemäärästä. Reaktoreihin asetetut MBR-lietteet oli suhteutettu orgaanisen ainesmäärän mukaan samoiksi. Koska hygienisoidun MBR-lietteen kuiva-aine ja orgaanisen aineen pitoisuus olivat korkeammat kuin hygienisoimattoman, tätä tuli reaktoriin massaltaan noin 25 prosenttia pienempi määrä. Tämä saattaa selittää osittain metallien pitoisuuseroa näytteiden välillä.

Metallit ovat kummassakin näytteessä alle raja-arvojen, paitsi sinkin pitoisuus, joka ylittää Suomessa kasvualueille määritetyn raja-arvon 300 mg/kg k.a. Kumpienkin näytteiden taudinaiheuttajat sekä POP-yhdisteet olivat kaikki alle raja-arvojen. PAH-yhdisteiden pitoisuuksien ero todennäköisesti johtui joko reaktorien näytteiden eroista, tai hygienisointi on hieman hajottanut PAH-yhdisteitä ennen lietteen sijoittamista reaktoriin.

## Märkäreaktorin haitta-aineet – syötteenä maatalouden sivuainevirrat

Maatalouden sivuainevirrat ovat hyvin erilaisia materiaaleja kuin esimerkiksi jätevesilietteet. Tällaisia sivuainevirtoja voi olla esimerkiksi erilaiset peltobiomassat ja lannat. Tästä syystä haitta-aineanalyysit tehtiin täysmittakaavan märkäreaktorille, jonka pääsyötteenä on maatalouden sivuainevirrat. Tämän reaktorin tulokset on esitetty taulukossa 6.

**TAULUKKO 6.** Märkäreaktorin haitta-ainepitoisuudet, kun syötteenä on maatalouden sivuainevirrat (ALS Finland Oy).

Kategoria	Haitta-aine	Laitosmittakaavaan märkäreaktori 13.6.2023
Metallit (mg/kg k.a.)	Arseeni (As)	< 0,50
	Elohopea (Hg)	< 0,20
	Kromi (Cr)	4,54
	Kupari (Cu)	62,2
	Lyijy (Pb)	< 1,0
	Nikkeli (Ni)	4,0
	Sinkki (Zn)	260
Taudinaiheuttajat	Salmonella	negatiivinen / 25 g
	E. coli	200 pmy/g
	Enterokokit	468 000 pmy/g k.a.
POP-yhdisteitä	PAH <sub>16</sub>	< 0,422 mg/kg k.a.
	PCDD/F-yhdisteet	0–40 ng/kg k.a.

Metallien ja PAH-yhdisteiden pitoisuudet olivat alle lannoitelain raja-arvojen. Patogeenien kohdalla *e. coli* määrä oli korkea. Tämä saattaa johtua esimerkiksi reaktorin syötteistä, kuten lannasta, jotka voivat luonnostaan sisältää *e. colia*. Mädäte tulisi mitata taudinaiheuttajien osalta uudelleen hygienisoinnin jälkeen ennen lannoitetuotteena markkinoimista.

Vaikka kansallinen lannoitelaki ei määritä PCDD/F-yhdisteille pitoisuusrajoja, Euroopan parlamentin ja neuvoston asetuksen (EU) 2019/1009 mukaan mädätteen PCDD/F-pitoisuus ylittää tiettyjen tuotteiden raja-arvot. Tästä syystä, jos mädätteestä haluttaisiin jatkojalostaa CE-merkittyä tuhkaa tai biohiiltä, dioksiinipitoisuus tulisi määrittää uudestaan.

## Täysmittakaavan biokaasureaktori – biojätesyötteenä kuivareaktori

BioCir-hankkeen toteutuksen aikana kahdesta täysmittakaavan biojättereaktorista otettiin näytteitä analysoitavaksi 27.6.2023. Kummankin kuivareaktorin syötteenä toimii erilliskerätty biojäte. Näytteiden tulokset on esitetty taulukossa 7.

**TAULUKKO 7.** Kahden täysmittakaavan biojättereaktorin näytteiden vertailu. Viiva taulukossa tarkoittaa alle pienimmän määrittäysrajan alittanutta tulosta. (ALS Finland Oy)

Kategoria	Haitta-aine	Biojättereaktori 1 27.6.2023	Biojättereaktori 2 27.6.2023
Metallit (mg/kg k.a.)	Arseeni (As)	0,71	0,67
	Elohopea (Hg)	< 0,20	< 0,20
	Kromi (Cr)	10,8	10,6
	Kupari (Cu)	31,4	27,7
	Lyijy (Pb)	2,4	1,8
	Nikkeli (Ni)	6,6	6,3
	Sinkki (Zn)	95	81
Taudin- aiheuttajat	Salmonella	negatiivinen / 25 g	negatiivinen / 25 g
	E. coli	< 10 pmy/g	< 10 pmy/g
	Enterokokit	84 200 pmy/g	43 100 pmy/g
POP- yhdisteitä	PAH16	< 0,180 mg/kg k.a.	< 0,210 mg/kg k.a.
	PCDD/F- yhdisteet	0–18 ng/kg k.a.	0–12 ng/kg k.a.

Biojättereaktorien metallipitoisuudet olivat hyvin lähellä toisiaan. Tämä johtuu todennäköisesti reaktorien samalta alueelta kerätyistä syötteesistä. Vaikka yhdyskuntabiojätteen koostumus ei ole tasalaatuista, saman yhdyskunnan biojättereaktoreissa tämä ero ei näiden näytteiden metallipitoisuuksissa näy.

Molemmat reaktorit alittivat kaikki muut lannoitelainsäädännön määrittämät rajat, mutta enterokokkien määrä ylitti mädätteille asetetun raja-arvon. Tässä tapauksessa mädätenäytteet on otettu reaktorien perästä ennen hygienisointia, mikä selittää korkean pitoisuuden. Jotta varmistetaan mädätteen soveltuvuus lannoitteiden raaka-aineeksi, tulisi analysoida näytteet ottaa vasta hygienisoinnin jälkeen.

## Demonstraatiomittakaavan kuivareaktori – BioLuuppi

BioLuuppi-tutkimusympäristön kuivareaktori on demonstraatiomittakaavan biokaasureaktori, jonka tilavuus on 0,5 m<sup>3</sup>. Kuivareaktorin koeajo käynnistettiin helmikuussa 2023, ja reaktorin syötteenä toimi nurmirehu-melassi-seos. Koeajon aikana reaktorista analysoitiin kahdesta näytteestä mädätteen haitta-aineet ja ominaisuudet. Ensimmäinen näyte otettiin 13.6.2023, jolloin orgaaninen kuormitus OLR (Organic loading rate) oli tasolla 1–3,5. Toinen näyte otettiin reaktorin purun yhteydessä, jota ennen OLR oli vaihdellut 1,1–4,0. Näytteiden tulokset on esitetty taulukossa 8.

**TAULUKKO 8.** BioLuupin kuivareaktorin lannoitekäytössä rajoitettujen haitta-aineiden muutokset 13.6.–16.10.2023 (ALS Finland Oy).

Kategoria	Haitta-aine	BioLuuppi-kuivareaktori 13.6.2023	BioLuuppi-kuivareaktori 16.10.2023
Metallit (mg/kg k.a.)	Arseeni (As)	< 0,50	< 0,50
	Elohopea (Hg)	< 0,20	< 0,20
	Kromi (Cr)	17,4	9,8
	Kupari (Cu)	27,2	22,9
	Lyijy (Pb)	2,2	1,7
	Nikkeli (Ni)	9,7	5,8
	Sinkki (Zn)	90,4	97,3
Taudinaiheuttajat	Salmonella	negatiivinen / 25 g	negatiivinen / 25 g
	E. coli	< 10 pmy/g	< 10 pmy/g
	Enterokokit	288 000 pmy/g k.a.	1 670 000 pmy/g k.a.
POP-yhdisteitä	PAH <sub>16</sub>	< 1,11 mg/kg k.a.	< 4,45 mg/kg k.a.
	PCDD/F-yhdisteet	0–40 ng/kg k.a.	0–14 ng/kg k.a.

Metallien osalta kaikki arvot olivat alle lannoitelain raja-arvojen. Koeajon aikana metallipitoisuudet olivat pääsääntöisesti pienentyneet pois lukien sinkin pitoisuus. Tämä kertonee siitä, että reaktorin syöte on mahdollisesti sisältänyt sinkkiä, muttei muita metalleja. Muut metallit ovat todennäköisesti tulleet reaktorin käynnistyksessä käytetyn ympin mukana, ja pitoisuudet ovat pienentyneet reaktorista tehtyjen poistojen myötä.

Salmonellaa tai *e. colia* ei reaktorin näytteistä todettu. Enterokokkeja näytteissä oli moninkertaisesti yli raja-arvojen. Määdäte tulee hygienisoida ennen markkinointia lannoitteena sekä Suomessa että EU:n tasolla, joten tämä määdäte kelpaisi tuotteeksi hygienisoinnin ja uusittujen mikrobiologisten määritysten jälkeen. BioLuuppi-ympäristössä ei ole käytettävissä hygienisointiyksikköä.

PAH-yhdisteiden määrät olivat näytteissä pienet ja alittivat raja-arvot (6 mg/kg ka). Kuivareaktorin ensimmäisen näytteen PCDD/F-yhdisteiden mahdollinen maksimimäärä ylitti raja-arvon (20 mg WHO:n toksisuusekvivalenttia/kg k.a.). Kuitenkin reaktorin purun yhteydessä otetuissa näytteissä pitoisuus oli pienentynyt, eli osa dioksiineista ja furaaneista oli mahdollisesti hajonnut prosessin aikana. Dioksiinien määrää on rajoitettu vain jatkojalostettaessa CE-merkittyjä tuhka- ja biohiilituotteita. Jos määdätteestä olisi tarkoitus tuottaa näitä tuotteita, pitäisi dioksiinipitoisuudet määrittää uudelleen määdätteen hygienisoinnin jälkeen.

## Testattujen määdätteiden käyttö lannoitekäytössä

Monet biokaasulaitosmäädätteet ovat ravintorikkaita, ja sitä kautta lannoitteet ovat erinomainen määdätteen jatkojalostuskohde. Näiden materiaalien sisältämät haitta-aineet sekä myös prosessissa käytetyt syötteet kuitenkin rajoittavat kyseisten materiaalien jalostamista lannoitetuotteiksi. Onkin tärkeää miettiä syötteiden ja prosessoinnin kannalta, mihin määdätettä halutaan käyttää jatkossa. Soveltuuko materiaali käytettäväksi sellaisenaan peltoviljelyssä tai esimerkiksi maanparannusaineen raaka-aineena.

Metallipitoisuudet olivat testatuissa näytteissä monesti alle raja-arvojen, ja niiden puolesta yhdessä muiden raaka-aineiden kanssa voivat pitoisuudet pienentyä niin, että määdäte sopiikin raaka-aineeksi. Sama tilanne oli myös POP-yhdisteiden pitoisuuksien kanssa.

Mädätteet sisältävät jonkin verran taudinaiheuttajia, jotka voisivat olla esteenä jatkokäytölle. Sekä kansallisille että EU-tason lannoitetuotteille on asetettu tarkat lämpötila-aikaprofiilit, jotka sisältävät hygienisoinnin, kompostoinnin tai korkean lämpötilan mädätyksen. Mitatut näytteet eivät kaikki täyttäneet näitä kriteereitä, koska näytteitä ei ollut vielä hygienisoitu. Kriteerit täyttäneet näytteet alittivat taudinaiheuttajien raja-arvot todistaen hygienisoinnin toimivuuden.

## Yhteenveto muista analysoiduista haitta-aineista

Näytteistä määritettiin, matriisista riippuen, jopa 170 eri haitta-aine-, alkuaine- ja ravinnepitoisuutta. Niitä kaikkia ei ole mahdollista käydä tässä artikkelissa läpi, joten edellä esitettyjen tuloksien lisäksi seuraavana on lyhyt yhteenveto havaituista tuloksista:

- Kahdesta näytteessä: MBR-lietteessä sekä jätevesilietettä syötteenä käyttävässä täysmittakaavan reaktorissa fosforipitoisuus oli niin korkea (yli 2,2 %), että se rajoittaa kadmiumpitoisuutta suhteessa fosforin määrään (50 mg/kg P). Näistä reaktoreista tulisi mitata kadmiumpitoisuus ennen tuotteistamista.
- Erityisesti jätevesireaktorin ja MBR-lietteen näytteissä oli suuria määriä liukoisia metalleja. Vaikka näitä ei lannoitelainsäädännöllä ole kaikkia rajoitettu, ne voivat silti aiheuttaa lannoitteena ympäristöön levitettyinä haittaa.
- Raja-arvottomia POP-yhdisteitä, kuten PFOS/PFOA-, AOX-, PCB-yhdisteitä, alkyylifenoleja, sekä yleisiä ftalaatteja, löytyi kaikista näytteistä, joista määritys kyettiin tekemään. Pitoisuudet olivat hyvin pieniä tai alle alimpien määritysrajojen.
- BioLuupin märkäreaktorin toukokuussa otetussa näytteessä PBDE-yhdisteitä oli jopa 4 500 ng/kg kuiva-ainetta. Samasta näytteestä löytyi myös kaikkia muita näytteitä suurempi määrä ftalaatteja: ftalaattien kokonaispitoisuus oli 582 mg/kg k.a. Näyte sisälsi suhteellisen paljon DEHP:tä, jonka pitoisuus oli 155 mg/kg kuiva-ainetta. Saman koeajon toinen näytepiste (5.7.) näytti ftalaattien määrän laskeneen noin kymmenesosaan ensimmäisestä näytteestä. MBR-lietettä sisältävien näytteiden PBDE-pitoisuudet olivat 630–1800 ng/kg k.a.
- Haihtuvien rasvahappojen (kokonais-VFA) määrät mitattiin kaikista näytteistä. Stabiilissa biokaasureaktorissa kokonais-VFA-pitoisuus on yleisemmin enintään 1 000 mg/l. Toisaalta pitoisuudet voivat olla

jopa 4 000 mg/l, jos reaktorissa on paljon ammoniakkia ja reaktorin mikrobikanta on tottunut siihen. Myös tätä suurempia lukemia on tavattu normaalisti toimivilta biokaasureaktoreilta (Drosg 2013). Täysmittakaavan reaktorien näytteiden haihtuvien rasvahappojen kokonaismäärät olivat hyvin lähellä toisiaan ja sijoittuvat 768–1320 mg/l. Bioluupin märkäreaktorin toukokuussa otetussa näytteessä ja erityisesti MBR-lietteessä haihtuvien rasvahappojen määrät olivat suuria (4 490 ja 11 300 mg/l). BioLuupin märkäreaktorin suuri VFA-määrä viittaa reaktorin suureen kuormitustilaan. BioLuupin märkäreaktoriin oli syötetty laimennettua melassia näytteenottohetkellä, ja reaktori saattoi olla lähellä ylikuormitustilaa. Tällaisessa tilanteessa normaalisti reaktorin syöttöä tulisi vähentää ja VFA-määrää tulisi pyrkiä vähentämään.

Kaikkien esitettyjen tulosten kohdalla tulee huomioida, että kyseessä on yksittäinen näyte eikä se edusta koko näytteenottoreaktorin todellisia pitoisuuksia. Varsinkin korkean kuiva-ainepitoisuuden sisältävä mädäte on hyvin heterogeenistä, ja siksi siitä otetut näytteet voivat poiketa reaktorin todellisesta tilanteesta. Mahdollisimman edustavan näytteen mittaamiseksi reaktorin mädäte tulisi olla täysin tasaiseksi sekoitettu, näytteenottopisteitä olisi hyvä olla eri puolilla reaktoreita ja erityisesti mikrobiologisia näytteitä ajatellen niiden tulisi olla steriilejä ennen näytteenottoa. Lisäksi näyte tulisi ottaa mielellään kokoomanäytteenä useamman päivän ajan, jolloin saataisiin parempi kuva reaktorin sisältämistä mahdollisista haitta-aineista.

## LÄHTEET

*Drosg, B.* 2013. Process monitoring in biogas plants. IEA BIOENERGY. E-kirja. Saatavissa: [https://www.researchgate.net/publication/261070596\\_Process\\_monitoring\\_in\\_biogas\\_plants](https://www.researchgate.net/publication/261070596_Process_monitoring_in_biogas_plants) [viitattu 14.11.2023].

*Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EU) 2019/1009.*

*Maa- ja metsätalousministeriön asetus lannoitevalmisteista 964/2023.*

*Ruokavirasto.* 2023 a. Jätevesilietteiden käyttö lannoitevalmisteena. WWW-sivu. Päivitetty 7.11.2023. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.ruokavirasto.fi/kasvit/lannoitevalmisteet/laatuvaatimukset/kierratyrsravinteet/jatevesilietteet/> [viitattu 15.11.2023].

*Ruokavirasto.* 2023 b. Haitalliset aineet, taudinaiheuttajat ja epäpuhtaudet. WWW-sivu. Päivitetty 2.11.2023. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.ruokavirasto.fi/kasvit/lannoitevalmisteet/laatuvaatimukset/haitalliset-aineet-ja-hygienia/> [viitattu 15.11.2023].



# SYÖTTEIDEN TUOMAT HAASTEET BIOKAASUPROSESSILLE

Tiina Saario & Hanne Soininen & Juha Luostarinen  
& Heikki Teittinen

Biokaasulaitoksen toiminnan ja tasaisen kaasuntuotannon takia reaktorin tulee saada koko ajan tasaisesti syötteitä. On lisäksi tärkeää olla tietoa siitä, mitä reaktoriin syötetään, sopiiko syöte tälle reaktorille ja miten syöte käyttäytyy. Testaamattomat materiaalit tai sellaiset, joiden laatu ei ole paras mahdollinen, voivat olla riski reaktorin toiminnalle. Epäsopiva syötemateriaali voi heikentää kaasuntuotantoa, huonontaa kaasunlaatua tai pahimmassa tapauksessa kaataa koko reaktorin. BioCir-hankkeen aikana Xamkin Ympäristölaboratoriossa testattiin laboratoriomittakaavassa kalankasvatuksen sivuainevirtojen soveltuvuutta biokaasuntuotantoon sekä sitä, miten erilaatuiset nurmirehut käyttäytyvät biokaasureaktorissa.

## Biokaasulaitosten syötemateriaalit

Biokaasulaitoksen syötemateriaaleiksi soveltuvat monenlaiset jäte- ja sivuvirrat, kuten yhdyskuntien ja elintarviketeollisuuden biojäte, jätevesi- ja viemärilietteet, erilaiset lannat ja kasvi- ja peltobiomassa. Biokaasulaitoksen reaktorin syötemateriaalien valinta riippuu hyvin paljon reaktorin tyypistä, kuiva-ainepitoisuudesta, esi- ja jälkikäsittelymenetelmistä sekä mädätteen jatkotuotteistamisesta. Biokaasureaktorin metanogeenit ovat yleensä tottuneet tietyn tyyppisiin syötteisiin. Jos syötematriisiin on tulossa suuria muutoksia, tulee muutokset ja niiden toteutus suunnitella etukäteen.

## Nurmirehun laatu vaikuttaa biokaasuntuotantoon

Nurmirehun tiedetään olevan hyvä syötemateriaali biokaasulaitoksilla. Täysmittakaavan laitoksilla ja koereaktoreissa on kuitenkin huomattu, että nurmirehun laatu ja sen varastointi vaikuttavat kaasuntuotantoon.

Pilaantunut säilörehu voi sisältää mykotoksiineja, jotka ovat näkymättömiä, mauttomia ja hajuttomia homekasvustossa muodostuneita myrkkyjä.

Mykotoksiineja voi siirtyä rehuun kasvustojen kautta, mutta niitä voi muodostua myös säilönnän ja varastoinnin aikana. Niiden muodostumiseen vaikuttavat muun muassa suuri kosteuspitoisuus, voimakkaat lämpötilavaihtelut ja hyönteiset. (Koivunen & Huuskonen 2018)

Nurmi- ja maissipohjaisissa säilörehuissa esiintyy yleisimmin *Aspergillus*-, *Fusarium*- ja *Penicillium*-homesieniä. Näistä *Fusarium* kulkeutuu yleensä pelloilta, kun taas *Aspergillus* ja *Penicillium* alkavat yleensä kasvaa varastoinnin yhteydessä. Näistä kahdesta *Penicilliumia* esiintyy enemmän Suomessa, koska se viihtyy viileässä ilmastossa, kun taas *Aspergillus* suosii lämmintä ilmastoa. (Cheli ym. 2013, Koivunen & Huuskonen 2018) Homesienet ja näiden hometoksiinien kasvuolosuhteita on esitelty taulukossa 1.

**TAULUKKO 1.** Eri hometoksiinien kasvu- ja toksiinituotanto-olosuhteet (Sweeney & Dobson 1998).

Homesieni	Hometoksiini	Lämpötila, °C		pH	
		Kasvu	Toksiini-tuotanto	Kasvu	Toksiini-tuotanto
<i>Aspergillus</i>	<i>A. parasiticus</i> ja <i>A. flavus</i> (aflatoksiini)	10–43 Optimi 32–35	12–40	2,1–11,2 Optimi 3,5–8	3,5–8 Optimi 6
	<i>A. orcha-reaceus</i> ja <i>A. sterigmato-cystin</i> (okratoksiini)	8–37 Optimi 24–37	12–37 Optimi 31	2,2–10 Optimi 3–10	
<i>Penicillium</i>	<i>P. verrucosum</i> (okratoksiini)	0–31 Optimi 20	4–20	2,1–10 Optimi 6–7	-
	<i>P. expansum</i> (patuliini)	-2–35 Optimi 25	-	3,2–3,8	-
	<i>P. Citrinin</i>	5–40 Optimi 26–30	15–37 Optimi 30	2–10 Optimi 5–7	-
<i>Fusarium</i> (Trichothecenes)	<i>Fusarium Gram-inearum</i> (DON, NIV, ZEO)	24–37 Optimi 24–26	24–37 Optimi 24–26	2,4 (30 °C) -3 (25–37 °C)	2,4 (30 °C) -3 (25–37 °C)
	<i>F. Sporotrichoi-des</i> (T-2, DON, NIV, ZEO)	-2–35 Optimi 22–23,5	-	-	-
	<i>F. Culmorum</i> (DON, ZEA)	0–31 Optimi 21	yli 25 (ZEA)	-	-
<i>Fusarium</i> (Fumonis-ins)	<i>F. Moniliforme</i> (B1)	2–37 Optimi 22,5–27,5	-	--	
	<i>F. Profilireratum</i> (B1, B2, B3)	2–37 Optimi 22,5–27,5	Optimi 25	-	-

Xamkin Ympäristölaboratoriossa testattiin eri tavoin varastoitujen nurmirehujen vaikutusta biokaasun ja metaanin tuotantoon. Maatilalta samana päivänä haettu nurmirehu jaettiin kolmeen erään, joista yksi pakastettiin (ns. tuore nurmirehu), yksi pidettiin kylmiössä viileässä viidessä asteessa ja yksi erä säilytettiin huoneenlämmössä. Näytteiden annettiin olla näissä olosuhteissa suljetuissa ämpäreissä noin kuukauden ajan, jonka jälkeen nurmirehuista selvitettiin niiden biokaasun ja metaanin tuottopotentialit panoskokeilla.

Kylmiössä ja pakastimessa olleet nurmirehut näyttivät ja tuoksuivat päällisin puolin aivan samanlaisilta. Huoneenlämmössä, suljetussa ämpäriä ollut nurmirehu oli merkittävästi homehtunut (kuva 1).



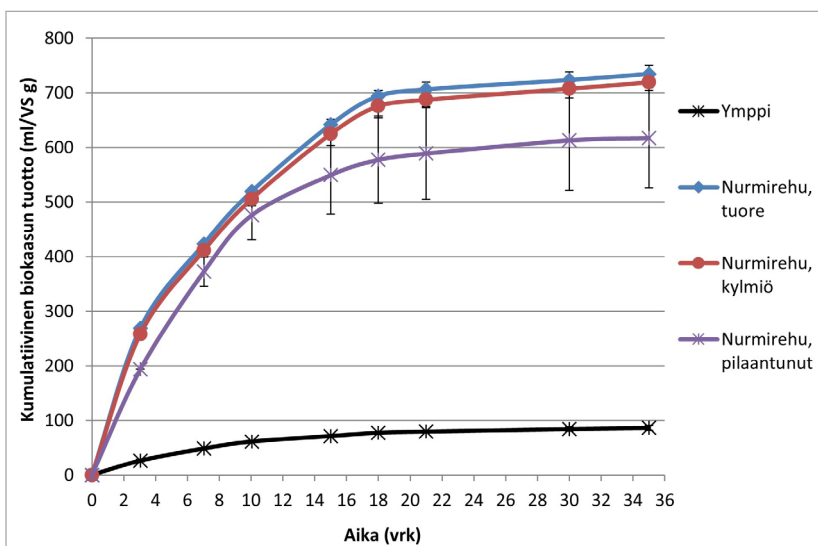
*KUVA 1. Kuukauden huoneenlämmössä seissyt, homeinen nurmirehu (vas.) ja samainen nurmirehu kaadettuna pois ämpäristä (oik.) (kuva Tiina Saario).*

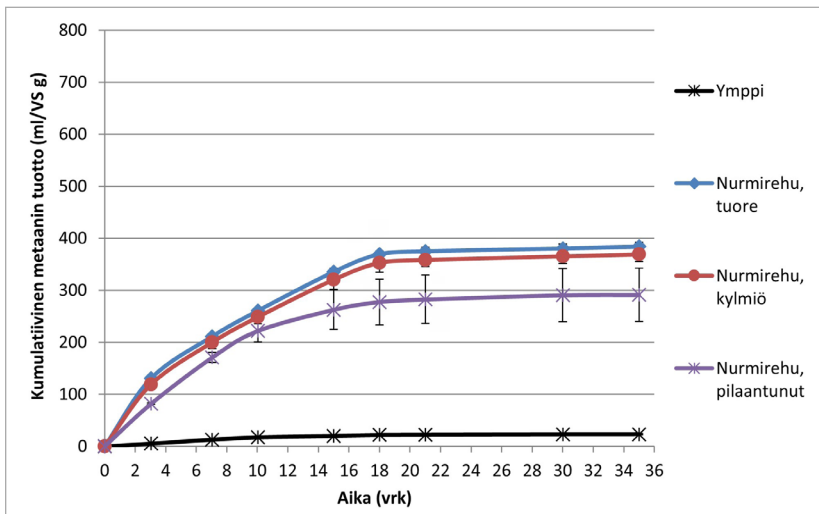
Kooreaktoreina käytettiin kahden litran lasipulloja, joihin lisättiin 750 grammaa ympäriä, 80 grammaa testattavaa nurmirehua ja 670 grammaa vettä. Reaktoreista poistettiin happi typpikaasun avulla, minkä jälkeen ne suljettiin ja asetettiin lämpökaappiin. Panosten annettiin olla 42 asteisessa lämpökaapissa 35 päivän ajan. Tuona aikana niitä sekoitettiin viisi kertaa viikossa pyöräyttämällä pulloja manuaalisesti. Pullojen korkkien läpi kuljivat letkut, joissa oli kiinni metaanin mittausyhde ja kaasupussi. Näiden avulla määritettiin biokaasun kokonaistuotto vesivaa’alla ja kaasukromatografilla metaanipitoisuudet. Purettujen reaktoreiden määnteiden analyysitulokset olivat lähes identtiset, eli näihin ei nurmirehun laadulla ollut vaikutusta (taulukko 2).

**TAULUKKO 2.** Purettujen panosreaktorien mädätteiden kemialliset ominaisuudet.

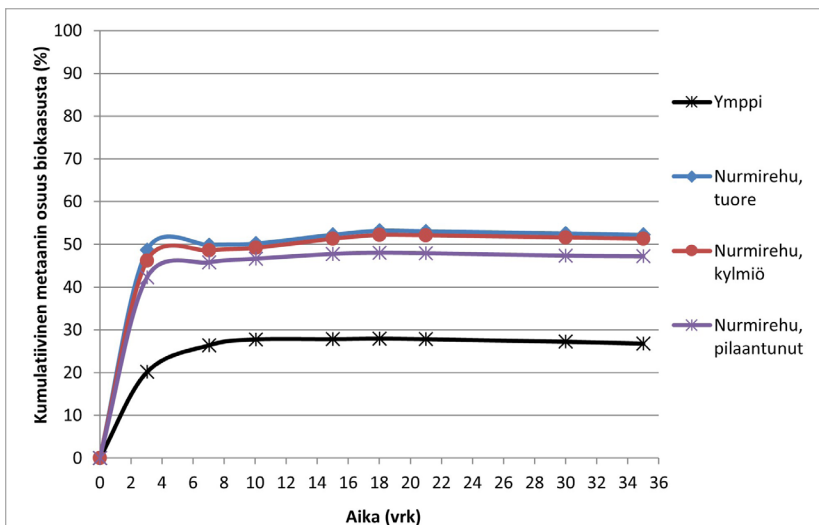
Reaktori	pH	Johtokyky mS/cm	Alkaliteetti (IA/PA)
Ympäri	7,7	13,1	0,28
Nurmirehu, tuore	7,6	14,5	0,25
Nurmirehu, kylmiö	7,7	14,7	0,27
Nurmirehu, pilaantunut	7,7	15,1	0,28

Kaasuntuotossa ja laadussa erot näkyivät huomattavasti selkeämmin (kuvat 2–4). Tuoretta nurmirehua sisältäneiden reaktoreiden kokeen aikana mitattu maksimimetaanipitoisuus oli 79 prosenttia. Kylmiössä säilytetyn nurmirehuan maksimimetaanipitoisuus oli hieman alhaisempi 77 prosenttia, mutta pilaantuneella nurmirehulla se oli selkeästi alhaisempi, vain 64 prosenttia.

**KUVU 2.** Erilaatuisten nurmirehujen vaikutus biokaasuntuotantoon.



KUVA 3. Erilaatuisten nurmirehujen vaikutus metaanintuotantoon.



KUVA 4. Metaanin osuus biokaasusta, kun raaka-aineena on erilaatuisia nurmirehuja.

Pilaantunut nurmirehu selkeästi vaikutti sen potentiaaliin tuottaa biokaasua ja metaania. Kaasuntuotanto käynnistyi yhtä aikaa parempilaatuisten nurmirehujen kanssa, mutta kokonaiskaasuntuotanto sekä metaanintuotanto olivat selkeästi vähäisempiä. Kylmiössä säilytetty nurmirehu oli säilynyt parempilaatusena kuin huoneenlämmössä säilytetty, mutta myös sen kaasuntuotanto oli hieman heikentynyt niin sanottuun tuoreeseen nurmirehuun verrattuna. Taulukossa 3 on esitelty kokeessa määritetyt biokaasun- ja metaanintuottopotentiaalit raaka-aineen orgaaniseen aineeseen ja kokonaismassaan suhteutettuina.

**TAULUKKO 3.** Erilaatuisen nurmirehun vaikutus metaanintuotantoon  
(<sup>a</sup> Ranta-Korhonen ym. 2018, Saario ym. 2019, <sup>b</sup> Luste ym. 2013, <sup>c</sup> Lehtomäki 2006).

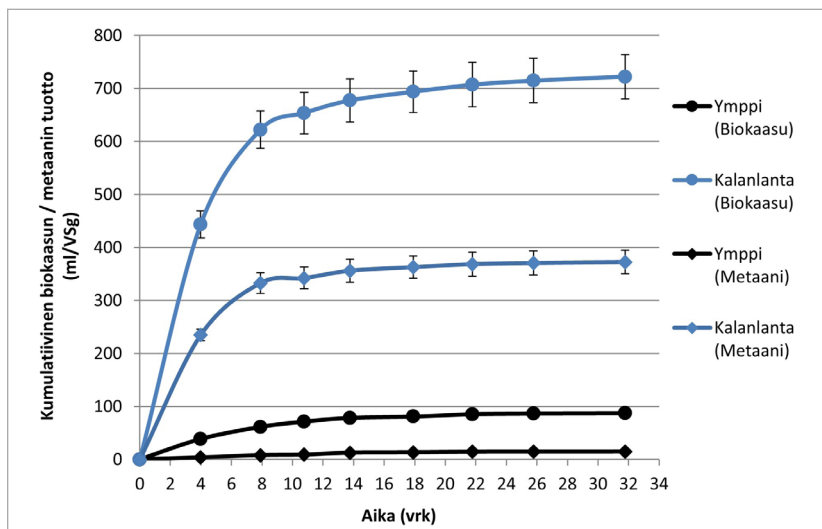
Raaka-aine	Menetelmä	Tuottopotentiaali raaka-aineen org. aineeseen suhteutettuna		Tuottopotentiaali raaka-aineen kokonaisuudessaan suhteutettuna	
		Biokaasu m <sup>3</sup> BG/ tVS	Metaani m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /tVS	Biokaasu m <sup>3</sup> BG/t	Metaani m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /t
Nurmirehu	Kirjallisuus	675–743 <sup>a</sup>	205–450 <sup>a, b, c</sup>	–	62 <sup>c</sup>
Nurmirehu, tuore	Pullokoee	648 (637–659)	370 (364–375)	180 (177–183)	103 (101–104)
Nurmirehu, kylmiö	Pullokoee	633 (616–645)	355 (339–364)	184 (179–187)	103 (99–106)
Nurmirehu, pilaantunut	Pullokoee	531 (466–596)	272 (235–310)	141 (124–158)	72 (62–82)

## Kalankasvattamon sivuvirrat syötemateriaaleina

Biokaasulaitokset voivat saada syötemateriaaleja elintarviketeollisuuden sivuvirroista. Yksi näistä teollisuuden aloista on kalankasvattamot ja kalankäsittelylaitokset. Xamkin Ympäristölaboratoriossa testattiin BioCir-hankkeessa kalankasvattamolta kerättyä kalanlantaa yhdessä lietelannan kanssa sekä jauhettua kalan perkuujätettä biokaasun tuotannossa.

Kalanlannan biokaasu- ja metaanituotantopotentiaalit määritettiin panoskokeina kahden litran lasipulloilla. Kokeiden toteutus tapahtui samalla tavalla kuin edellä esitellyssä nurmirehukokeessa. Märkämädättämöön perustuvan biokaasureaktorin mädätteen ja veden sekaan lisättiin 210 grammaa kalanlantaa ja tämän seoksen kaasuntuotantoa seurattiin 32 päivän ajan.

Kuvassa 5 on esitetty kalanlannan biokaasun ja metaanin tuotot kokeen aikana. Lanta tuotti hyvin kaasua, ja kaasun metaanipitoisuus oli koko kokeen ajan yli 50 prosenttia. Kalanlannan biokaasuntuotantopotentiaali lannan sisältämään orgaaniseen aineeseen suhteutettuna oli 635 m<sup>3</sup>/t<sub>VS</sub> ja metaanintuotantopotentiaali 358 m<sup>3</sup>/t<sub>VS</sub>. Laboratoriokokeiden perusteella kalanlanta soveltuu hyvin biokaasulaitoksen syötemateriaaliksi.



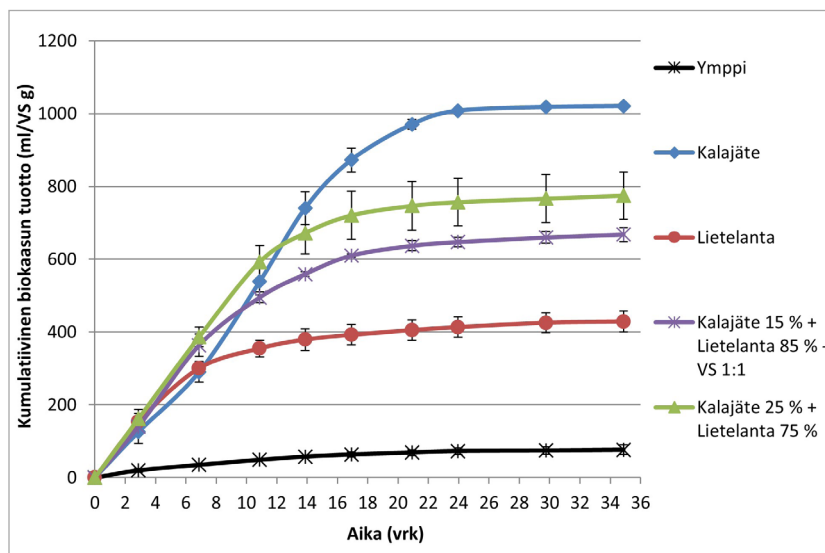
KUVA 5. Kalanlannan biokaasun ja metaanin tuotto panoskokeen aikana.

Jauhettua kalan perkuujätettä testattiin yhdessä naudan lietalannan kanssa biokaasun tuotannossa. Molemmat raaka-aineet testattiin sekä yksinään että kahdessa eri seoksessa. Ensimmäisessä seoksessa pyrittiin raaka-aineiden seokseen tuoma organisen aineksen määrä tasamaan suhteeseen noin 1:1. Tällöin seoksessa oli 85 prosenttia lietalantaa ja 15 prosenttia perkuujätettä. Toisessa seoksessa haluttiin nostaa perkuujätteen määrää 25 prosenttia, jolloin kuitenkin lietalanta pysyi edelleen niin sanottuna pääsyötteenä. Käytetyt määrät ja niiden sisältämät kuiva-aineen ja organisen aineen määrät on esitetty taulukossa 4. Kokeiden toteutus tapahtui samalla tavalla kuin edellä esitellyissä kokeissa.

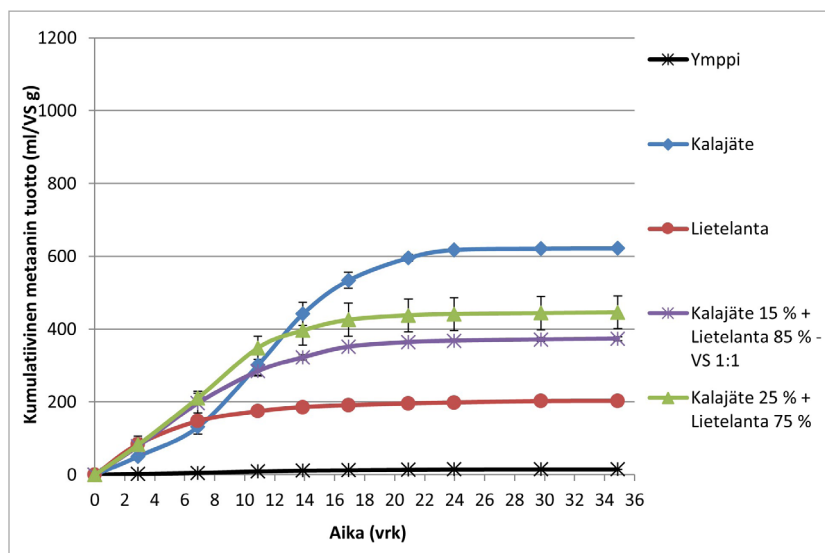
TAULUKKO 4. Koesarjan reaktoreiden koostumus.

Materiaalit (märkämassa)	Kuiva-aine, TS g	Orgaaninen aines, VS g
Ymppi 750 g	34,2	25,2
Ymppi 750 g + Kalajäte 70 g	60,4	49,5
Ymppi 750 g + Lietelanta 385 g	62,4	48,7
Ymppi 750 g + Kalajäte 35 g + Lietelanta 194 g	61,5	49,2
Ymppi 750 g + Kalajäte 45 g + Lietelanta 135 g	61,0	49,1

Naudan lietelannasta, kalan perkuujätteestä ja näiden seoksista analysoidut kaasumäärät on esitetty kuvissa 6–7. Seoksissa kalan perkuujätteen reaktoreiden maksimimetaanipitoisuutta yli kymmenellä prosentilla siitä, mitä lietelanta olisi yksinään tuottanut. Lietelannalle mitattu maksimimetaanipitoisuus kokeen aikana oli 54 prosenttia, kun taas seosten maksimipitoisuus oli 66 prosenttia ja pelkän kalan perkuujätteen 70 prosenttia.



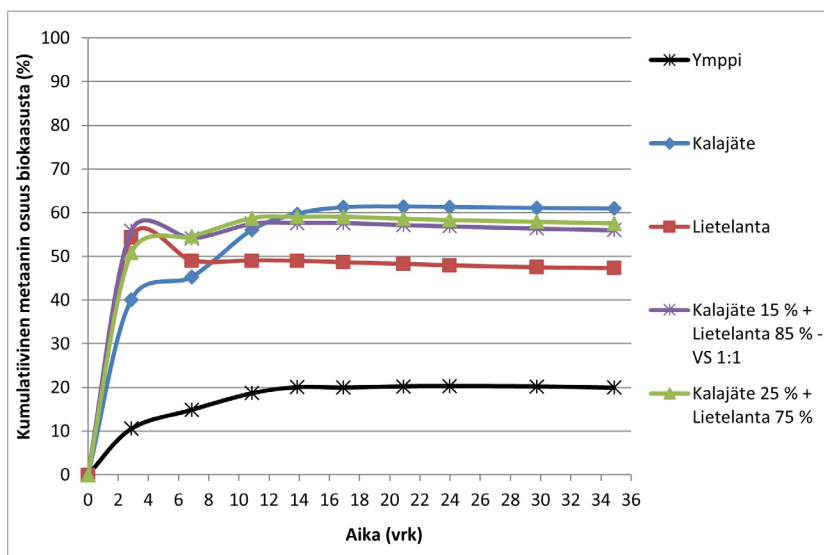
KUVA 6. Biokaasun tuotto lietelannasta, kalanlannasta ja näiden seoksista.



KUVA 7. Metaanin tuotto lietelannasta, kalanlannasta ja näiden seoksesta.



Kalan perkuujäte on erinomainen syötemateriaali biokaasun ja metaanin lähteeksi. Kun seoksesta 15 prosenttia on kalan perkuujätettä, kasvoi biokaasun tuotto noin 50 prosentilla siitä, mitä se oli pelkällä naudan lietelannalla. Metaanintuotanto kasvoi lähes saman verran. Kun kalan määrää kasvatettiin, kaasuntuotanto parani entisestään. Kuitenkaan kasvu ei tapahtunut samassa suhteessa lisääntyneen kalan määrän kanssa. Myöskään kaasun sisältämän metaanin pitoisuudessa (kuva 8) ei ollut juurikaan eroa eri perkuujätepitoisuuksien välillä.



KUVA 8. Metaanipitoisuus biokaasussa, kun syötteenä käytetään lietelantaa, kalanlantaa ja näiden seosta.

Biokaasun- ja metaanintuottopotentiaaleista (taulukko 5) voidaan todeta, että kalan perkuujäte soveltuu laboratoriomittakaavan testien mukaan erinomaisesti biokaasun raaka-aineeksi ja biokaasureaktorin syötemateriaaliksi. Kuitenkin olisi suotavaa tehdä laitoskohtaisia reseptiointitestejä, jotta löydetään yhdessä laitoksen muiden syötteiden kanssa optimaalinen syötesuhde. Näin saataisiin aikaan paras mahdollinen kaasuntuotto.

**TAULUKKO 5.** Kalan perkuujätteen metaani- ja kaasuntuottopotentiaalit  
(<sup>a</sup> Kafle & Kim 2012, <sup>b</sup> Ranta-Korhonen ym. 2018, <sup>c</sup> Luste ym. 2013, Lehtomäki 2006).

Raaka-aine	Menetelmä	Tuottopotentiaali raaka-aineen org. aineeseen suhteutettuna		Tuottopotentiaali raaka-aineen kokonaismassaan suhteutettuna	
		Biokaasu m <sup>3</sup> BG/ tVS	Metaani m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> / tVS	Biokaasu m <sup>3</sup> BG/t	Metaani m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /t
Kalajäte	Pullokoheet	944 (944–944)	607 (606–608)	334 (334–334)	215 (214–215)
	Kirjallisuus	757 <sup>a</sup>	554 <sup>a</sup>	-	-
Lietelanta	Pullokoheet	353 (325–383)	188 (174–201)	22 (20–23)	11 (11–12)
	Kirjallisuus	342–531 <sup>b</sup>	130–240 <sup>b,c</sup>	-	-
Kalajäte 15 % + Lietelanta 85 %	Pullokoheet	591 (578–605)	359 (355–363)	62 (61–63)	38 (37–38)
Kalajäte 25 % + Lietelanta 85 %	Pullokoheet	699 (616–738)	431 (386–477)	91 (83–99)	57 (51–63)

# LÄHTEET

*Cheli, F., Campagnoli, A. & Dell’Orto, V.* 2013. Fungal populations and mycotoxins in silages: From occurrence to analysis. *Animal Feed Science and Technology* 1-2, 1-16. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2013.01.013> [Viitattu 13.11.2023]

*Kafle, G. K. & Kim, S. H.* 2012. Evaluation of the biogas productivity potential of fish waste: A lab scale batch study. *Journal of Biosystems Engineering* 5, 312-313. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://doi.org/10.5307/JBE.2012.37.5.302> [Viitattu 13.11.2023].

*Koivunen, E. & Huuskonen, A.* 2018. Säilörehun hometoksiinit ja niiden vaikutus naudoilla. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 19/2018. PDF-dokumentti. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-562-2> [Viitattu 13.11.2023].

*Lehtomäki, A.* 2006. Biogas production from energy crops and crop residues. Jyväskylän yliopisto. Bio- ja ympäristötieteiden laitos. Väitöskirja. Jyväskylä Studiens in Biological and Environmental Science 163. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://jyx.jyu.fi/bitstream/handle/123456789/13152/9513925595.pdf> [viitattu 13.11.2023]

*Luste, S., Seppäläinen, S. & Soininen H.* 2013. Etelä-Savossa saatavilla olevien orgaanisten materiaalien soveltuvuus biokaasulaitoksen raaka-aineeksi – metaanintuottopotentiaalit, yhteismädätys ja hygienia. Teoksessa *livonen, S., Jäppinen, E., Laihanen, M., Luste, S., Nykänen, A., Ranta-Korhonen, T., Seppäläinen, S., Seuri, P., Soininen, H., Tontti, T. & Väisänen, H.-M. (toim.) Energiaomavarainen maatila. Helsingin yliopiston julkaisusarja – Julkaisuja 29. Helsingin yliopisto Ruralia-instituutti, 27–40. PDF-dokumentti. Saatavissa <https://helda.helsinki.fi/server/api/core/bitstreams/527d2ddf-b2c2-4d6a-b7aa-bd0902e01607/content> [Viitattu 13.11.2023].*

*Ranta-Korhonen, T., Soininen, H., Saario, T. & Särkkä, H.* 2018. Lääke- ja kemikaalijäämien vaikutus biokaasuntuotantoon. Teoksessa *Soininen H., Haatanen, N. & Pulkkinen, L. (toim.) Metsä, ympäristö ja energia – Soveltavaa tutkimusta ja tuotekehitystä – Vuosijulkaisu 2018. Xamk kehittää 61. Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, 43–54.*

*Saario, T., Teittinen, H., Gråsten, J. & Heinonen, A.* 2019. Esikäsittelyn ja sekoituksen vaikutus kaasuntuotantoon - Case-panoskokeet. Teoksessa Soininen H., Haatanen, N. & Pulkkinen, L. (toim.) *Metsä, ympäristö ja energia – Soveltavaa tutkimusta ja tuotekehitystä.* – Vuosijulkaisu 2019. Xamk kehittää 101. Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, 96–101.

*Sweeney, M.J. & Dobson, A.D.W.* 1998. Mycotoxin production by *Aspergillus*, *Fusarium* and *Penicillium* species. *International Journal of Food Microbiology* 3, 141–158. PDF-dokumentti. Saatavissa [https://doi.org/10.1016/S0168-1605\(98\)00112-3](https://doi.org/10.1016/S0168-1605(98)00112-3) [Viitattu 13.11.2023]

# BIOKAASULAITOKSILLE TULEVIEN RAAKA-AINEVIRTOJEN SISÄLTÄMÄT HAITALLISET AINEET JA NIIDEN VAIKUTUKSET PROSESSIIN

Tiina Saario & Antti Metsälä & Hanne Soininen

Biokaasulaitoksille syötettävien raaka-ainevirtojen koostumus ja alkuainepitoisuudet vaihtelevat. Raaka-aineen koostumuksella ja sen sisältämällä mahdollisilla haitta-aineilla on vaikutusta biokaasureaktorin kaasuntuotantoon ja mädätteen laatuun. Syötemateriaalien sisältämät mahdolliset haitalliset yhdisteet tai vierasaineet voivat häiritä reaktorin toimintaa ja kaasuntuottoa. Tässä artikkelissa kuvataan erilaisten haitallisten aineiden, kuten muovien, kemikaalien ja lääkeaineiden, vaikutuksia biokaasuprosessin eri vaiheisiin.

## Lääkeaineet

Lääkeaineet ovat välttämättömiä turvaamaan ihmisten ja eläinten hyvinvointia. Niiden vaikutukset eivät kuitenkaan rajoitu ainoastaan elimistöön, sillä niitä ja niiden metaboliatuotteita kulkeutuu myös elimistön läpi. Tätä kautta niitä päätyy jätevedenpuhdistamoille ja maatalojen lantajätteisiin. Kulutuksen lisäksi lääkeaineita voi päätyä jätevesiin myös lääketeollisuudesta. Sekä jätevedenpuhdistuksen lietteitä että maatalouden jätteitä voidaan käsitellä biokaasuprosesseissa, joissa anaerobinen mikrobitoiminta tuottaa biokaasua orgaanisista aineista.

Biokaasuprosessin mädätysjäännöksiä voidaan hyötykäyttää lannoitteina, mutta lääkeainejäämät voivat aiheuttaa haittaa ympäristössä. Eriyisen haitallisia ovat erilaiset antibiootit, sillä mikrobit voivat kehittyä vastustuskykyisiksi niille ja vastustuskyky voi levitä muihin ympäristön bakteereihin. Vastustuskyvyn levitessä patogeeneihin niiden aiheuttamia sairauksia ei voida enää hoitaa nykyisin antibiootein. (Summers 2002) Taulukossa 1 on esitelty Suomen kymmenen kulutetuinta lääkeainetta

vuonna 2019. Taulukossa on myös esitetty niiden ympäristölle riskiä kuvaavat akuutit vaikuttavat konsentraatiot, joissa aineilla on puolet haittavaikutuksista (EC50-arvot) sekä vesiliukoisuusarvot.

**TAULUKKO 1.** Fimean ja Kansaneläkelaitoksen listaamat Suomen kymmenen kulutetuinta lääkeainetta vuonna 2019 tuhatta asukasta kohden määriteltyjen vuorokausiannosten (DDD, Defined Daily dose) mukaan.

(<sup>a</sup> Pubchem-tietokanta, <sup>b</sup> Posthuma ym. 2019)

	Luokittelu (käyttö)	DDD / 1000 as / vrk	Vesiliukoisuus (25 °C) <sup>a</sup>	EC50 (µg/L) <sup>b</sup>
Ramipriili	ACE-inhibiittori (verenpaine, sydänsairaudet)	73,5	11,2 mg/L (arvio)	4,02
Asetyylisalisyyli-happo (aspiriini)	Tulehduskipulääke	63,9	4,6 g/L	5,25
Amlodipiini	Kalsiumkanavan salpaaja (verenpaine, sepelvaltimotauti)	62,9	75,3 mg/L (arvio)	3,16
Atorvastatiini	Statiini (kolesteroliarvon alentaminen)	56,2	1,12·10 <sup>-3</sup> mg/L (arvio)	2,6
Ibuprofeeni	Tulehduskipulääke	51,1	21 mg/L	4,31
Losartaani	Angiotensiini-reseptorin salpaajat (verenpaine, sydänsairaudet)	47,2	8,22 mg/L (arvio)	6,2
Kandesartaani	Angiotensiini-reseptorin salpaajat (verenpaine, sydänsairaudet)	43,2	0,14 mg/L (arvio)	4,94
Bisoprololi	Beetasalpaaja (verenpaine, sydänsairaudet)	38,6	2,24 g/L (arvio)	3,82
Parasetamoli (asetaminofeeni)	Kipulääke	38,3	14 g/L	5,22
Pantopratsoli	Protonipumpun estäjät (mahahaava)	Biojäte	798	480

Kaikkien lääkeaineiden ympäristövaikutuksista, hajoamisesta sekä pitoisuuksista jätevirroissa tarvitaan lisää tietoa. Samoin tarvitaan lisää tietoa myös lääkeaineiden metabolia- ja hajoamistuotteista.

## Kipuläkkeet

Suomalaisissa jätevesilietteissä ibuprofeenia on mitattu 100–950 mikrogrammaa kuiva-ainekilogrammaa kohti kuudella jätevedenpuhdistamolla

tehdyssä tutkimuksessa (Fjäder 2016) ja voidaan olettaa pitoisuuksien märkätilavuutta kohden ylittävän EC50-arvon. Ibuprofeenin vaikutusta biokaasuprosessiin on tutkittu jo toistakymmentä vuotta. Musso ym. (2010) totesivat sen inhiboivan prosessia jo pitoisuudessa 250 µg/l, mutta Silvan ym. (2020) tutkimuksessa inhibiatiovaikutuksia on havaittu asetoklastisten metanogeenien toimintaan vasta pitoisuudessa 50 mg/l. Ibuprofeenin hajoamista on todettu useissa tutkimuksissa, ja esimerkiksi Gonzalez-Salgado ym. (2020), Phan ym. (2018) ja Yang ym. (2016) ovat huomanneet, että se ei hajoa kovin hyvin biokaasuprosessissa. Carballa ym. (2007) totesivat tämän saman jatkuvatoimisilla pilot-mittakaavan biokaasukokeilla. Tutkimuksessa määritettiin, että ibuprofeenin poistuma mesofiilisessä prosessissa oli 28–62 prosenttia ja termofiilisessä 40–55 prosenttia.

Parasetamoli ja aspiriini hajoavat hyvin biokaasuprosessissa, eikä niillä näytä olevan inhiboivia vaikutuksia, korkeintaan aspiriini saattaa hie-man hidastaa kaasunmuodostuksen alkamista (Phan ym. 2018; Yang ym. 2016; Musso ym. 2010). Aspiriini hajoaa prosessissa salisyylilihapoksi, ja siitä noin 30 prosenttia hajoaa mädätyksen aikana täysin ja loput jakaantuvat tasaisesti neste- ja kiintotianefaaseihin (Phan ym. 2018). Hajoamaton parasetamolijäännös päättyy lähes kokonaan mädätteen nestejakeeseen (Ali ym. 2019).

## Verenpainelääkkeet

Jätevesilietteistä on löydetty myös esimerkiksi jäänteitä verenpainelääkkeistä. Ruotsalaisessa tutkimuksessa Malmborg ja Magnér (2015) havaitsivat amlodiinia 50 µg sekä beetasalpaajista atenololia 40–70 µg ja metoprololia 150–1 500 µg kuiva-ainekilogrammaa kohti. Tutkimuksessa todettiin, että amlopidiinistä hajosi termofiilisessä mädätyksessä 45 prosenttia ja mesofiilisessä 35 prosenttia. Beetasalpaajista atenololista hajosi mesofiilisessä prosessissa 68 prosenttia ja termofiilisessä 39 prosenttia, kun taas metoprololista hajosi mesofiilisessä vain 20 prosenttia.

## Antibiootit

Antibiootteja voidaan pitää lääkeaineista ongelmallisimpina. Ne nimensä mukaisesti tuhoavat bakteereja, eli ne voivat aiheuttaa erityistä haittaa biokaasuprosessin mikrobeille. Tästä syystä antibioottien käyttäytymistä biokaasuprosessissa on tutkittu vuosien saatossa paljon.

Tutkimuksissa on todettu antibioottien vaikutuksen prosessiin sekä antibioottien hajoamisen olevan hyvin antibioottikohtaista. Sanz ym. (1996) testasivat 15:tä eri antibioottia, ja suurin osa näistä aiheutti korkeintaan 20 prosentin laskun biometaanin tuotannossa. Liu ym. (2018) taas tutkivat 20:n eri antibiootin hajoamista ja totesivat jokaisessa luokassa olleen antibiootteja, joiden pitoisuus kasvoi, sekä antibiootteja, joiden pitoisuus laski. Antibiooteista on myös havaittu, että useimmat niistä hajoavat paremmin kompostoinnissa kuin mädätyksessä, mutta kompostointikaan ei hajota tehokkaasti kaikkia antibiootteja (Sanz ym. 1996, Liu ym. 2018).

Lu ym. (2016) ja Alenzi ym. (2021) ovat tutkineet jatkuvatoimisilla pilot-mittakaavan reaktoreilla pidempiaikaisten lääkeaineiden ja lääkeseosten vaikutusta biokaasuprosessiin. Kokeissa on havaittu, että pidempiaikainen altistus tetrasykliinantibiooteille on erittäin haitallista biokaasuprosessille. Kun pilot-mittakaavan reaktorin syötteessä oli 250 µg/l tetrasykliinantibioottia, reaktori pystyi noin ensimmäisen kymmenen päivän ajan melko hyvin hajottamaan sitä. Antibioottipitoisen syötteen jatkuessa reaktorin kaasutuotto ja kyky hajottaa antibioottia heikkenivät huomattavasti: 90 päivän jälkeen kaasutuotto oli laskenut noin kolmannekseen ja antibiootista hajosi enää 2–10 prosenttia. Näissä tutkimuksissa havaittiin myös, että vaikka metaanin ja hiilidioksidin tuotto laski, nousi vedyn tuotto ja lyhytketjuisten rasvahappojen konsentraatio. Tämä indikoi tutkittujen antibioottien inhiboivan erityisesti metanogeenien toimintaa, mutta ei niinkään reaktorin asido- ja asetogenejä.

Amoksisilliinin ja kefaleksiinin on todettu inhiboivan biokaasuntuotantoa panoskokeissa. Pienillä pitoisuuksilla amoksisilliinin inhibiatiovaikutus kesti muutaman päivän, suuremmilla viikosta noin kahteen. Tämän jälkeen mikrobit kuitenkin palautuivat altistuksesta. (Ranta-Korhonen ym. 2018, Feng ym. 2017, Lallai ym. 2002) Kefaleksiinin vaikutus oli voimakkaampi, ja reaktorin palautuminen kesti kokeissa 25 päivää (Lu ym. 2014).

## Muovit

Muovit ovat laaja materiaaliluokka, johon kuuluvilla aineilla on valtava kirjo erilaisia ominaisuuksia ja käyttökohteita. Yleisyytensä vuoksi muoveja päätyy myös sellaisiin jätteenkäsittelyprosesseihin, joihin niitä ei ole tarkoitettu, kuten biojätteeseen. Biokaasulaitoksille päätyvistä raaka-ainevirroista lähes kaikissa voidaan olettaa olevan vähintäänkin pieniä määriä muoveja, mutta merkittävin lähde on todennäköisesti yhdyskuntabiojäte. Yleensä biojäte kerätään erilliskeräyksenä, mutta yritykset



voivat toimittaa sitä myös alkuperäispakkauksissaan, jolloin pakkausmateriaalien määrä biojätteessä kasvaa entisestään. Vuonna 2015 tehdyn selvityksen mukaan Suomen pääkaupunkiseudun biojätteessä oli jätelähteestä riippuen biohajoavia muoveja 2,3–6,3 painoprosenttia ja muita muoveja 0,5–3,8 painoprosenttia (Kontturi 2016).

Prosessissa muovikappaleet voivat takertua eri laiteosiin esimerkiksi kiertymällä liikkuvien osien ympärille. Sekoittimen lapojen ja akselien ympärille kiertynyt muovi heikentää sekoituksen toimintaa, mikä takia sekoitustehoa joudutaan nostamaan. Jos muovit tarttuvat putkilinjoihin tai niiden suille, heikentyy virtaus, mikä taas nostaa vaadittavaa pumpaustehoa.

Fysikaalisten ominaisuuksien vuoksi muoveista aiheutuu riskejä biokaasulaitosten prosessilaitteille. Jos reaktorin sekoitus ei ole riittävä, voivat muovit pienen tiheydensä vuoksi muodostaa reaktoriin kelluvan kerroksen. Tällaisen kerrostuman on todettu estävän biokaasun vapautumista reaktorimassasta ja siten laskevan biokaasutuottoa (Lienen ym. 2013, Lindmark ym. 2014). Kerros voi myös tukkia kaasulinjat, jolloin kaasu ei pääse poistumaan reaktorista (Hwu ym. 1998). Lisäksi muoveilla on yleisesti huono lämmönjohtokyky, mikä voi heikentää lämmönsiirtoa esilämmityksessä, reaktorissa tai hygienisoinnissa.

Biokaasulaitosten mädätysjäännöksiä käytetään monesti lannoitevalmisteina, ja se aiheuttaa omat haasteensa muovien sekä muiden epäpuhtauksien erotukselle prosessista. Maa- ja metsätalousministeriön lannoitevalmisteista antaman uuden asetuksen 964/2023 mukaan mädäte, josta valmistetaan lannoitteita, saa sisältää

- Raja-arvot 31.12.2027 asti
  - yli 2 millimetrin epäpuhtauksia (lasi, metalli tai muovi) enintään 5 grammaa per kilogramma kuiva-ainetta
  - Yhteensä epäpuhtauksia (lasi, metalli tai muovi) enintään 10 grammaa per kilogramma kuiva-ainetta.
- Raja-arvot 1.1.2028 alkaen
  - yli 2 millimetrin epäpuhtauksia (lasi, metalli tai muovi) enintään 2,5 grammaa per kilogramma kuiva-ainetta
  - Yhteensä epäpuhtauksia (lasi, metalli tai muovi) enintään 5 grammaa per kilogramma kuiva-ainetta.

## Biohajoavat muovit

Biohajoavuudella tarkoitetaan muovien hajoamista mikrobitoiminnan seurauksena siten, että mikrobit pilkkovat muovin polymeeriketjuja ravinnokseen. Polymeeriketjut pilkkoutuvat myös fysikaalisten ja kemiallisten tekijöiden vaikutuksesta, kuten UV-säteilyn, hapettumisreaktioiden ja mekaanisen kulutuksen vuoksi. Biohajoaviin muoveihin kuuluu useita eri materiaaleja, mutta näistä biokaasuprosessien tavallisien viipymääikojen aikana hajoavia materiaaleja ovat muun muassa polyhydroksialkanaateista (PHA) tärkkelystä, selluloosasta ja pektiinistä valmistetut muovit. (Bátori ym. 2018)

Biohajoavista muoveista esimerkiksi selluloosa, tärkkelys ja polylaktidi-pohjaiset materiaalit eivät Zhangin ym. (2018) tekemän tutkimuksen mukaan aiheuta inhibitioreaktiota reaktorissa. Se ei kuitenkaan tarkoita, etteikö biohajoava muovi voisi olla haitaksi reaktorin toiminnalle. Gasopti-hankkeessa vuonna 2019 tehdyn kyselyn (Saario & Mörsky 2019) mukaan biojätteen mukana tulevat biopussit ovat yksi suurimmista laitoksen toimintaa haittaavista tekijöistä. Biohajoavasta muovista tehdyt pussit eivät ehdi hajota kierron aikana, eikä niitä pystytä seulomaan biojätteestä pois samalla tavalla kuin esimerkiksi tavallisia muovipusseja. Lämmitessään nämä pussit lähtevät venymään ja kiertyvät sekoittajien ympärille. Tästä syystä osa laitoksista haluaisi kokonaan kieltää biohajoavasta muovista valmistetut biojätepussit. Tämän takia biohajoavan muovin käyttäytymisestä on tehty useita tutkimuksia. Taulukossa 2 on esitelty eri materiaalien käyttäytymistä mädätyksen aikana.

**TAULUKKO 2.** Biohajoavien muovien käyttäytyminen biokaasuprosessissa.

Materiaali	Hajoaminen	Lähde
Tärkkelys	Tärkkelys 60 % - hartsi 40 % -seos Kuivamädätyksessä yli 80 %:n hajoaminen 30 vuorokaudessa	Bastioli 1998
Polybutyleeni-sukkinaatit, PBS	2 %:n hajoaminen 100 vuorokaudessa	Cho ym. 2011
Polykaprolaktonit, PCL	Mesofiilinen prosessi 12,5 %:n hajoaminen 277 vuorokaudessa. Termofiilinen prosessi 62–80 %:n hajoaminen 50–150 vuorokaudessa.	Quecholac-Piña ym. 2020
Polyhydroksi-alkanoaatit, PHA	Mesofiilinen prosessi 83–96 %:n hajoaminen 16 vuorokaudessa	Budwill ym. 1992
Polylaktidit, PLA	Mesofiilinen prosessi 0,1–91,5 %:n hajoaminen 56–170 vuorokaudessa. Termofiilinen prosessi 70–98,9 %:n hajoaminen 45–150 vuorokaudessa	Quecholac-Piña ym. 2020
Polyvinyyli-alkoholit, PVA	Hidas, ellei sekoita nopeammin hajoavien biopolymeerien, kuten tärkkelyksen, kanssa.	Quecholac-Piña ym. 2020, Bátori ym. 2018, Russo ym. 2009, Pšejka ym. 2006

Erilaisten biohajoamattomien muovien hajoaminen biokaasuprosessissa vaihtelee siis polymeeristä ja seostuksesta riippuen. Jotkut muovilaadut voivat hajota biokaasuprosessien normaalien viipymääaikojen mukaan, mutta useimmat eivät, joten suurimman osan biohajoavista muoveista voidaan olettaa kulkeutuvan poistomädätteen mukaan. Koska lainsäädäntö ei erottele biohajoavia ja -hajoamattomia muoveja arvioitaessa roskien määrää lannoitevalmisteissa, suuri määrä biohajoamatonta muovia aiheuttaa sen, ettei sitä voida enää laillisesti myydä lannoitevalmisteena.

## Kemikaalit ja alkuaineet

Biokaasuprosessiin pääsee erilaisia kemikaaleja lähes kaikkien syötevirtojen mukana. Esimerkiksi jätevedet tuovat mukanaan puhdistusaineita, huuhteluvirtoja, desinfiointiaineita, nurmirehut säilöntä- ja torjunta-aineita. Monet näistä eivät pieninä määrinä vaikuta juuri lainkaan prosessin toimintaan, mutta kertyessään voivat pahimmillaan kaataa koko reaktorin toiminnan. Toisaalta vaikka ne eivät vaikuttaisi prosessiin millään tavalla, kemikaalit ja haitta-aineet voivat estää mädätteen jatkokäytön.

Koska erilaisia kemikaaleja on olemassa miljoonittain, niitä ei kaikkia käydä läpi tässä selvityksessä. Alle on koottu muutamia yleisiä aineita, jotka voivat helposti eri syötevirtojen kautta päätyä biokaasureaktoriin ja haitata joko sen toimintaa tai sen tuotannon jatkokäyttöä.

Siloksaaneja käytetään muun muassa tiivisteissä, eristeissä, voiteluaineissa, pinnoitteissa, sairaalatarvikkeissa, kosmetiikassa ja hygieniatuotteissa. Biokaasuprosessiin niitä päätyy jätevesien ja jätteiden mukana, ja prosessissa osa niistä päätyy edelleen biokaasuun. Kaasuun päätyvät siloksaanit heikentävät kaasunpuhdistuksen toimintaa, ja biokaasua poltettaessa niistä muodostuu piidioksidia, joka voi kerääntyä laitteistojen pinnoille useiden millimetrien kerroksiksi. Pinnoilla piidioksidikerrostumat heikentävät laitteistojen tehoa ja aiheuttavat hankaumia liikkuvissa osissa, kuten turbiineissa ja männissä. Piidioksidi heikentää myös katalyyttien toimintaa esimerkiksi savukaasunpuhdistuksessa ja polttonkennoissa. (Soreanu ym. 2018, Accettola ym. 2008, Ajhar ym. 2010)

Jätevesilietteen sisältämien raskasmetallien on todettu haittaavan merkittävästi biokaasuprosessia sekä siitä syntyvän mädätteen jatkokäyttöä. Abdel-Shafy ja Mansour (2014) määrittivät elohopealle, kadmiumille ja kromi(III) inhibitiokonsentraatiot, joissa ne alkavat haitata prosessin toimintaa, sekä myrkytysrajat, joissa kaasun kokonaistuotto on alentunut yli 60 prosenttia. Määritetyt rajat on esitetty taulukossa 3.

**TAULUKKO 3.** Raskasmetallien haitalliset pitoisuudet anaerobisessa bioreaktorissa (Abdel-Shafy & Mansour 2014).

Raskasmetalli	Inhiboiva konsentraatio		Myrkytysraja	
	mg/l	g/kg (kuiva)	mg/l	g/kg (kuiva)
Elohopea	125	0,125	> 250	> 0,25
Kadmium	170	0,170	> 340	> 0,34
Kromi (III)	775	0,775	> 1550	> 1,55

PVC-muovin on todettu laskevan sekä tuotetun metaanin määrää että hydrolyysikerrointa. Laskun syy ei kuitenkaan ollut PVC-polymeeri, vaan siitä liukeneva lisäaine bisfenoli-A (BPA), joka inhiboi biokaasuprosessin hydrolyysi- ja haponmuodostumisprosesseja. (Wei ym. 2019)

## LÄHTEET

*Abdel-Shafy, H. I. & Mansour, M. S. M.* 2014. Biogas production as affected by heavy metals in the anaerobic digestion of sludge. *Egyptian Journal of Petroleum* 4, 409–417. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2014.09.009> [Viitattu 14.11.2023].

*Accettola, F., Guebitz, G. M. & Schoeftner, R.* 2008. Siloxane removal from biogas by biofiltration: biodegradation studies. *Clean Technologies and Environmental Policy* 2, 211–218. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://doi.org/10.1007/s10098-007-0141-4> [Viitattu 14.11.2023].

*Ajhar, M., Travasset, M., Yüce, S. & Melin, T.* 2010. Siloxane removal from landfill and digester gas – A technology overview. *Bioresource Technology* 9, 2913–2923. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.12.018> [Viitattu 14.11.2023].

*Alenzi, A., Hunter, C., Spencer, J., Roberts, J., Craft, J., Pahl, O. & Escudero, A.* 2021. Pharmaceuticals effect and removal, at environmentally relevant concentrations, from sewage sludge during anaerobic digestion. *Bioresource Technology* 319, 124102. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124102> [Viitattu 13.11.2023]

*Ali, A. M., Nesse, A. S., Eich-Greatorex, S., Sogn, T. A., Aanrud, S. G., Aasen Bunæs, J. A., Lyche, J. L. & Kallenborn, R.* 2019. Organic contaminants of emerging concern in Norwegian digestates from biogas production. *Environmental Science: Processes & Impacts* 9, 1498–1508. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://doi.org/10.1039/c9em00175a> [Viitattu 13.11.2023]

*Bastoli, C.* 1998. Properties and applications of Mater-Bi starch-based materials. *Polymer Degradation and Stability* 1, 263–272. PDF-dokumentti. Saatavissa: [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(97\)00156-0](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(97)00156-0) [Viitattu 14.11.2023].

*Bátori, V., Åkesson, D., Zamani, A., Taherzadeh, M. J. & Sárvári Horváth, I.* 2018. Anaerobic degradation of bioplastics: A review. *Waste Management* 80, 406–413. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.09.040> [Viitattu 14.11.2023].

*Budwill, K., Fedorak, P. M. & Page, W. J.* 1992. Methanogenic degradation of poly(3-hydroxyalkanoates). *Applied and Environmental Microbiology* 4, 1398–1401. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://doi.org/10.1128/aem.58.4.1398-1401.1992> [Viitattu 14.11.2023].

*Carballa, M., Omil, F., Ternes, T. & Lema, J. M.* 2007. Fate of pharmaceutical and personal care products (PPCPs) during anaerobic digestion of sewage sludge. *Water Research* 10, 2139–2150. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.02.012> [Viitattu 13.11.2023]

*Cho, H. S., Moon, H. S., Kim, M., Nam K. & Kim, J. Y.* 2011. Biodegradability and biodegradation rate of poly(caprolactone)-starch blend and poly(butylene succinate) biodegradable polymer under aerobic and anaerobic environment. *Waste Management* 3, 475–480. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.10.029> [Viitattu 14.11.2023].

*Feng, L., Casas, M. E., Ottosen, L. D. M., Møller, H. B. & Bester, K.* 2017. Removal of antibiotics during the anaerobic digestion of pig manure. *Science of The Total Environment* 15, 219–225. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.280> [Viitattu 13.11.2023]

*Fjäder, P.* 2016. Yhdyskuntajätevesilietteiden maatalouskäytön ja viherkentämisen riskit – RUSSOA I-III. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 43. Suomen ympäristökeskus. PDF-dokumentti. Saatavissa: <http://hdl.handle.net/10138/169282> [Viitattu 13.11.2023]

*Gonzalez-Salgado, I., Cavaille, L., Dubos, S., Mengelle, E., Kim, C., Bounouba, M., Paul, E., Pommier, S. & Bessiere, Y.* 2020. Combining thermophilic aerobic reactor (TAR) with mesophilic anaerobic digestion (MAD) improves the degradation of pharmaceutical compounds. *Water Research* 182, 116033. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116033> [Viitattu 13.11.2023]

*Hwu, C.-S., van Lie, J. B. & Lettinga, G.* 1998. Physicochemical and biological performance of expanded granular sludge bed reactors treating long-chain fatty acids. *Process Biochemistry* 1, 75–81. PDF-dokumentti. Saatavissa: [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(97\)00051-4](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(97)00051-4) [Viitattu 13.11.2023]

*Kontturi, H.* 2016. Pääkaupunkiseudun seka- ja biojätteen koostumus vuonna 2015. Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä. Helsinki. 46. PDF-dokumentti. Saatavissa: [https://kivo.fi/wp-content/uploads/HSY\\_2016.pdf](https://kivo.fi/wp-content/uploads/HSY_2016.pdf) [Viitattu 13.11.2023]

*Lallai, A., Mura, G. & Onnis, N.* 2002. The effects of certain antibiotics on biogas production in the anaerobic digestion of pig waste slurry. *Bioresource Technology* 2, 205–208. PDF-dokumentti. Saatavissa: [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00162-6](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00162-6) [Viitattu 13.11.2023]

*Lienen, T., Kleyböcker, A., Brehmer, M., Kraume, M., Moeller, L., Görsch, K. & Würdemann, H.* 2013. Floating layer formation, foaming, and microbial community structure change in full-scale biogas plant due to disruption of mixing and substrate overloading. *Energy, Sustainability and Society* 1, 20. PDF-dokumentti. <https://doi.org/10.1186/2192-0567-3-20> [Viitattu 13.11.2023]

*Lindmark, J., Thorin, E., Bel Fdhila, R. & Dahlquist, E.* 2014. Effects of mixing on the result of anaerobic digestion: Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 40, 1030–1047. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.182> [Viitattu 13.11.2023].

*Liu, H., Pu, C., Yu, X., Sun, Y. & Chen, J.* 2018. Removal of tetracyclines, sulfonamides, and quinolones by industrial-scale composting and anaerobic digestion processes. *Environmental Science and Pollution Research* 36, 35835–35844. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1487-3> [Viitattu 13.11.2023]

*Lu, M., Niu, X., Liu, W., Zhang, J., Wang, J., Yang, J., Wang, W. & Yang, Z.* 2016. Biogas generation in anaerobic wastewater treatment under tetracycline antibiotic pressure. *Scientific Reports* 1, 28336. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://doi.org/10.1038/srep28336> [Viitattu 13.11.2023]

*Lu, X., Zhen, G., Liu, Y., Hojo, T., Estrada, A. L. & Li, Y.-Y.* 2014. Long-term effect of the antibiotic cefalexin on methane production during waste activated sludge anaerobic digestion. *Bioresource Technology* 169, 644–651. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.07.056> [Viitattu 13.11.2023]

*Maa- ja metsätalousministeriön asetus lannoitevalmisteista 964/2023.*

*Malmborg, J. & Magnér, J.* 2015. Pharmaceutical residues in sewage sludge: Effect of sanitization and anaerobic digestion. *Journal of Environmental Management* 153, 1–10. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.01.041> [Viitattu 13.11.2023]



Musson, S. E., Campo, P., Tolaymat, T., Suidan, M. & Townsend, T. G. 2010. Assessment of the anaerobic degradation of six active pharmaceutical ingredients. *Science of The Total Environment* 9, 2068–2074. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.11.042> [Viitattu 13.11.2023]

Quecholac-Piña, X., del C. Hernández-Berriel, M., del C. Mañón-Salas, M., Espinosa-Valdemar, R. M. & Vázquez-Morillas, A. 2020. Degradation of Plastics under Anaerobic Conditions: A Short Review. *Polymers* 1, 109. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://doi.org/10.3390/polym12010109> [Viitattu 14.11.2023].

Phan, H. V., Wickham, R., Xie, S., McDonald, J. A., Khan, S. J., Ngo, H. H., Guo, W. & Nghiem, L. D. 2018. The fate of trace organic contaminants during anaerobic digestion of primary sludge: A pilot scale study. *Bioresource Technology* 256, 384–390. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.02.040> [Viitattu 13.11.2023]

Posthuma, L., van Gils, J., Zijp, M. C., van de Meent, D. & de Zwart, D. 2019. Species sensitivity distributions for use in environmental protection, assessment, and management of aquatic ecosystems for 12 386 chemicals. *Environmental Toxicology and Chemistry* 4, 905–917. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://doi.org/10.1002/etc.4373> [Viitattu 13.11.2023]

Pšeja, J., Charvátová, H., Hružík, P., Hrnčířík, J. & Kupec, J. 2006. Anaerobic Biodegradation of Blends Based on Polyvinyl Alcohol. *Journal of Polymers and the Environment* 2, 185–190. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://doi.org/10.1007/s10924-006-0009-4> [Viitattu 14.11.2023].

*PubChem*. National library of Medicine. Verkkotietokanta. Saatavissa: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/> [Viitattu: 2.8.2021].

Russo, M. A. L., O’Sullivan, C., Rounsefell, B., Halley, P. J., Truss, R. & Clarke, W. P. 2009. The anaerobic degradability of thermoplastic starch: Polyvinyl alcohol blends: Potential biodegradable food packaging materials. *Bioresource Technology* 5, 1705–1710. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.09.026> [Viitattu 14.11.2023].

Saario, T. & Mörsky, S. 2019. Biokaasulaitosten monitorointia Suomessa ja ulkomailla. Teoksessa Soinin H., Haatanen, N. & Pulkkinen, L. (toim.) *Metsä, ympäristö ja energia – Soveltavaa tutkimusta ja tuotekehitystä. – Vuosijulkaisu 2019*. Xamk kehittää 101. Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, 83–89.

*Sanz, J. L., Rodríguez, N. & Amils, E.* 1996. The action of antibiotics on the anaerobic digestion process. *Applied Microbiology and Biotechnology* 5-6, 587–592. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://doi.org/10.1007/s002530050865> [Viitattu 13.11.2023]

*Silva, A. R., Gomes, J. C., Salvador, A. F., Martins, G., Alves, M. M. & Pereira, L.* Ciprofloxacin, diclofenac, ibuprofen and 17 $\alpha$ -ethinylestradiol differentially affect the activity of acetogens and methanogens in anaerobic communities. *Ecotoxicology* 7, 866–875. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://doi.org/10.1007/s10646-020-02256-7> [Viitattu 13.11.2023]

*Soreanu, G., Béland, M., Falletta, P., Edmonson, K., Svoboda, L., Al-Jamal, M. & Seto, P.* 2011. Approaches concerning siloxane removal from biogas - A review. *Canadian Biosystems Engineering / Le Genie des Biosystèmes au Canada* 53, 8.1–8.18.

*Summers, A. O.* 2002. Generally overlooked fundamentals of bacterial genetics and ecology. *Clinical Infectious Diseases* 34, 85–92. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://doi.org/10.1086/340245> [Viitattu 13.11.2023]

*Suomen lääketilasto – Finnish statistics of medicines 2019.* 2020. Lääkealan turvallisuus- ja kehittämiskeskus Fimea ja Kansaneläkelaitos. Helsinki. E-kirja. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe20201217101079> [Viitattu 13.11.2023].

*Wei, W., Huang, Q.-S., Sun, J., Wang, J.-Y., Wu, S. L. & Ni, B.-J.* 2019. Polyvinyl Chloride Microplastics Affect Methane Production from the Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge through Leaching Toxic Bisphenol-A. *Environmental Science & Technology* 5, 2509–2517. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b07069> [viitattu 14.11.2023].

*Yang, S., Hai, F. I., Price, W. E., McDonald, J., Khan, S. J. & Nghiem, L. D.* 2016. Occurrence of trace organic contaminants in wastewater sludge and their removals by anaerobic digestion. *Bioresource Technology* 210, 153–159. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.12.080> [Viitattu 13.11.2023]

# BIOHAJOAVAT MUOVIT BIOKAASUPROSESSIN HAASTEENA

Tiina Saario & Jonne Gråsten

Biojätteen on jo pitkään tiedetty olevan loistava biokaasun raaka-aine, ja niin myös Mikkelissä kerätty biojäte pääsääntöisesti päätyy biokaasun syötemateriaaliksi. Biojätteessä on kuitenkin seassa materiaaleja, jotka periaatteessa sinne kuuluvat, mutta voivat tuottaa ongelmia biokaasuprosessissa tai mädätteen jatkojalostuksessa. Tällaisia ovat biohajoavat muovit, jotka eivät välttämättä ehdi hajota prosessin aikana. Xamkin Ympäristölaboratoriossa testattiin hajotuskokeilla erilaisten biojätteen keräyksessä käytettävien materiaalien hajoamista biokaasuprosessissa. Lisäksi testattiin, miten biojätteeseen lajiteltu paperi vaikuttaa biokaasuntuotantoon.

## Biohajoava muovi biokaasu- ja kompostointilaitosten rasitteena

Koska maailmalla yleisenä trendinä on muovin määrän vähentäminen, on pyritty kehittämään vaihtoehtoisia pakkausmateriaaleja. Tästä syystä entistä enemmän markkinoille tuodaan erilaisia tuotteita, joiden pakkausten sanotaan olevan kompostoituvia tai biohajoavia. Näiden kohdalla nouseekin kysymys, että mitä vaaditaan materiaalilta, jotta se voidaan luokitella kompostoituvaksi tai biohajoavaksi ja vastaavatko nämä vaatimukset biokaasu- ja kompostointilaitoksen tarpeita. Euroopan unionin laatima standardi EN 13432 käsittelee pakkausmateriaalien kompostoituvuus- ja biohajoavuusvaatimuksia. Siinä määritellään, että kompostoituvan muovin tulee hajota 90-prosenttisesti teollisuuden kompostointiolosuhteissa alle 12 viikon aikana. Tämä tarkoittaa muun muassa yli 60 °C:n lämpötilaa. (Vrins & Contenoble 2019.) Kuitenkin monet teolliset kompostointi- ja biokaasulaitokset käyttävät huomattavasti lyhyempää kompostointiaikaa, ja varsinkin biokaasulaitoksilla lämpötilat ovat selkeästi alhaisempia.

Tästä syystä on jo pitkään puhuttu erilaisten biohajoavien muovien, erityisesti biojätepussien aiheuttamista ongelmista biokaasu- ja kompostointilaitoksilla. Materiaalit eivät ehdi hajota käsittelyn aikana, vaan joko kulkeutuvat mädätteen poiston mukana ulos prosessista tai jäävät kiinni prosessilaitteisiin esimerkiksi kiertymällä sekoittajalapojen ympärille. GasOpti-hankkeessa suoritetun kyselyn pohjalta biokaasulaitokset kokivat biohajoavan muovin yhdeksi suurimmista ongelmantuottajista laitoilla, ja ne olisivat halukkaita jopa kieltämään materiaalin käytön tai lajittelun biojätteeseen (Saario & Mörsky 2019; Saario ym. 2020). Ongelma koskee myös tavallista kotikompostoijaa, sillä biohajoavasta muovista valmistetut tuotteet eivät hajoakaan kotikompostorissa.

## Biohajoavien biojätteen keräysmateriaalien hajotuskokeet laboratoriossa

Xamkin Ympäristölaboratoriossa testattiin erilaisia biojätteen keräykseen käytettäviä materiaaleja. Testissä oli sekä pieniä, kaupasta saatavia biohajoavia tai kompostoituvia noin 20 litran biojäte- ja hedelmäpusseja sekä isoja, keräysastioissa käytettäviä 240 litran keräyssäkkejä. Lisäksi testattiin sanomalehteä, josta moni taho kehottaa askartelemaan itse biojätepussin. Kuvissa 1–3 on esitelty erilaisia testattuja materiaaleja.



KUVA 1. Biohajoavasta tai kompostoituvasta muovista valmistetut pussit. Vasemmalta oikealle Bioska+, Naturabiomat kompostoituva biopussi, BioMat kompostoituva biopussi 20 l ja TÜV Austrian kompostoituva hedelmä- ja vihannespussi (kuvat Tiina Saario).



KUVA 2. Biohajoavasta muovista valmistetut säkit. Vasemmalla bioMat kompostoitava suojasäkki 240 l ja oikealla BioBag Finland Oy:n 240 l:n suojasäkki (kuvat Tiina Saario).



KUVA 3. Paperiset, biojätteen keräämiseen suositellut materiaalit. Vasemmalla paperinen biojättepusse ja oikealla sanomalehtiarkki. (kuvat Tiina Saario)

Xamkin Ympäristölaboratoriossa tehtiin kolme samalla menetelmällä toteutettua hajotuskoesarjaa. Kokeissa tehtiin jokaiselle testattavalle kohteelle kaksi rinnakkaista hajotusreaktoria, joista toiseen laitettiin testikappale kokonaisena ja toiseen revittyinä. Tällä päästiin testaamaan, miten esimerkiksi biojätteen kuljetuksen tai esikäsittelymurskauksen yhteydessä tapahtuva materiaalin repeäminen vaikuttaa sen hajoamisnopeuteen. Testikappaleena toimi aina yksi pussi tai sanomalehtiarkki. Säkit olivat sellaisinaan turhan isoja kahden litran testireaktoreihin, joten niitä laitettiin reaktoriin joko puolikas tai kolmannes riippuen testisarjasta. Hajotusta edistämään reaktoreihin lisättiin kilo märkämädätykseen

pohjautuvan biokaasulaitoksen reaktorimädätettä sekä puoli litraa vettä. Testireaktorit huuhdeltiin tyypivirralla ilman poistamiseksi ja suljettiin tulpalla. Reaktoreita pidettiin lämpökaapissa + 42 °C:n lämpötilassa 28 vuorokautta, jonka aikana niitä käytiin manuaalisesti sekoittamassa 3–5 kertaa viikossa.

Hajotuskokeen päätyttyä reaktorit tyhjennettiin siivilään, josta eroteltiin hajoamaton materiaali. Erotellut materiaalit huuhdeltiin vesiastiassa, minkä jälkeen niiden annettiin kuivua. Materiaaleille suoritettiin sekä purun yhteydessä että niiden kuivuttua silmämääräinen ja kosketuspohjainen hajoamisarviointi. Yhteenveto eri testisarjojen tuloksista on esitetty taulukossa 1.

**TAULUKKO 1.** Hajotuskokeissa testatut materiaalit ja niiden hajoaminen kokeen aikana.

Tyyppi	Merkki, koko	Kokonainen	Revitty
Biomuovipussi	Bioska+ 10–20 l	Materiaali haurastunut, repeää käsiteltäessä. Selkeä malli kadonnut.	Pienimmät palaset hajonneet.
	Naturabio- mat 10–20 l	Pussi yhä ehjä ja kokonainen. Kestää helposti litran, pari vettä.	Ei haurastumista
	Biomat 20 l	Pussi yhä ehjä ja kokonainen. Kestää helposti litran, pari vettä.	Ei haurastumista
	TÜV Austria 10–20 l	Tuntuu hauraammalta ja muodostunut useita reikiä.	Venyy aiempaa helpommin, pehmentynyt.
Biomuovisäkki	Biomat 240 l	Ehjä, ei haurastumista	Ei haurastumista
	BioBag Finland Oy 240 l	Ei haurastumista	Ei haurastumista
Paperipussi	-	Pientä silppua, joka hajoaa käsiteltäessä. Selkeästi suurin osa hajonnut.	Suurin osa tai lähes kokonaan hajonnut
Sanomalehti	-	Paperimassamaista puuroa	Paperimassamaista puuroa

Pienistä biomuovipusseista ainoastaan Bioska+ lähti selkeästi hajoamaan ja TÜV Austrian -pussi alkoi heiketä. Muut pussit eivät osoittaneet minkäänlaista haurastumisen merkkiä, ja kokonaiset pussit kestivät ongelmitta myös muutaman litran vettä (kuva 4). Isot säkit pysyivät myös täysin ehjinä, eivätkä revityt palasetkaan osoittaneet haurastumisen merkkejä.



*KUVA 4. Biohajotettavat biopussit hajotuskokeen jälkeen reaktoreissa. Vasemmalta oikealle Naturabiomat kompostoitava biopussi tyhjänä ja vesirasituksessa sekä bioMat 20 l tyhjänä ja vesirasituksessa (kuvat Tiina Saario ja Jussi Konttila).*

Paperipussi ja sanomalehti taas hajosivat kokeen aikana selkeästi. Kokonaisesta paperipussista oli jäljellä silppua, joka hajosi käsiteltäessä, ja revitystä ei jäänyt jäljelle käytännössä sitäkään. Sanomalehti oli hajonnut täysin, mutta muodostanut hajotessaan paperimassamaista puuroa. Voi olla, että molemmat olisivat hajonneet vielä tehokkaammin, jos reaktoreissa olisi ollut jatkuvampi sekoitus.

## Paperin vaikutus biokaasuntuotantoon

Biokaasulaitoksia kiinnostaa biohajoavien materiaalien varsinaisen hajoamisen lisäksi myös niiden vaikutus biokaasun- ja metaanintuotantoon. Paperia ei biojätteen mukana kulkeudu reaktoreihin ainoastaan biojätekeräyspussien myötä, vaan sinne päättyy myös erilaisia pehmopapereita, kuten käsipyyhkeitä, servettejä ja nenäliinoja. Xamkin Ympäristölaboratoriossa testattiin paperisen biojättepussin ja tavallisen käsipyyhepaperin vaikutusta biokaasuntuotantoon. Kokeissa paperittoman biojätteen sekaan lisättiin viisi tai 30 prosenttia testatun biojätteen massaa vastaava määrä silputtua paperituotetta. Määrissä tämä tarkoitti viidellä prosentilla joko kolmea käsipaperia tai 1/3 paperipussia ja 30 prosentilla 18 käsipaperia tai kahta paperipussia. Lisäksi testattiin pelkän paperittoman biojätteen biokaasun- ja metaanintuotto. Testatut paperimäärät on esitetty kuvassa 5.



KUVA 5. Reaktorien sisältämä biojäte-, käsipaperi- ja paperipussimäärät. Pulloissa silputtuna testattu paperimäärä ja pullojen edessä sama määrä silppuamattomana (kuvat Tiina Saario).

Koe toteutettiin kahden litran lasipulloissa, joihin lisättiin 750 g märkämädätykseen perustuvan biokaasulaitoksen reaktorimädätettä eli ympiä, 120 g biojätettä ja reaktorista riippuen kuvan 5 paperituotemäärä. Käytetyn biojätteen määrä oli määritetty niin, että sen ja ympin sisältämän orgaanisen aineen määrä oli noin 1:1. Paperien sisältämää orgaanisen aineen määrää ei tässä kohtaa otettu huomioon. Tämän jälkeen reaktoreihin lisättiin vettä niin, että seoksen kokonaismassaksi tuli 1 500 grammaa. Jotta saatiin tietää puhtaasti pelkän biojätteen ja paperien mahdolliset haittavaikutukset, sarjassa oli myös pelkkää ympiä ja vettä sisältävät nollareaktorit, jotta ympin vaikutus saatiin määritettyä pois.

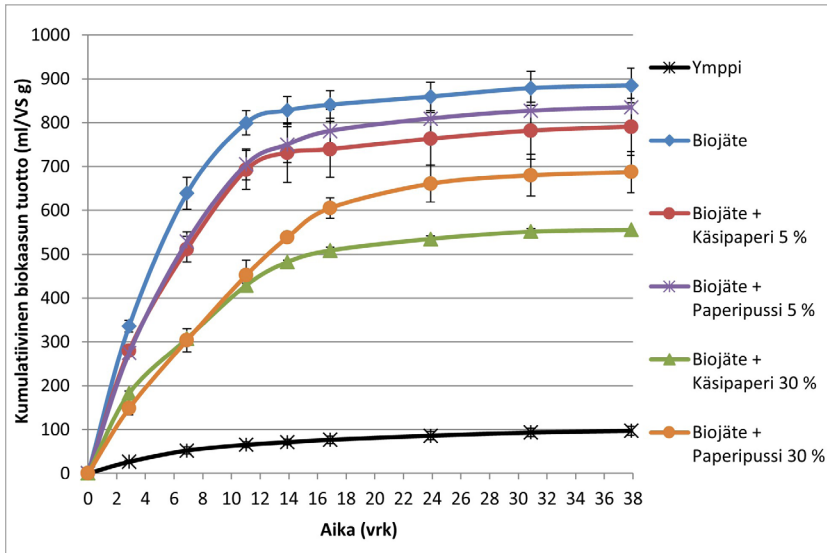
Täytettyjen reaktorien nestepinta huuhdeltiin typpikaasulla, minkä jälkeen ne suljettiin kumitulpalla, jossa oli kiinni letku ja metaaniyhde. Letkuun kiinnitettiin kaasupussi ja reaktorit asetettiin lämpökaappiin noin 40 °C:n lämpötilaan. Reaktorien sekoitus tapahtui manuaalisesti pyöryttämällä niitä käsin noin viitenä päivänä viikossa ja reaktoreiden tuottamasta kaasusta määritettiin biokaasun tilavuus vesivaa’alla ja metaanipitoisuus kaasukromatografilla.

Koesarja oli käynnissä 39 vuorokautta. Reaktoreita purettaessa havaittiin, että viisi prosenttia paperipussisilppua sisältäneissä reaktoreissa ei paperia ollut havaittavissa käytännössä lainkaan, kun taas käsipaperia sisältäneen reaktorin mädätteessä paloja esiintyi jonkin verran. 30 prosenttia paperituotetta sisältäneissä reaktoreissa kumpaakin paperityyppiä oli havaittavissa, mutta jäljellä ollut paperi hajosi helposti käsiteltäessä. Uskotavasti jatkuvammalla, tehokkaammalla sekoituksella materiaalit olisivat hajonneet täysin. Jatkuvamman sekoituksen puutteen havaitsi esimerkiksi siinä, että 30 prosenttia käsipaperia sisältäneen reaktorin pinnalle

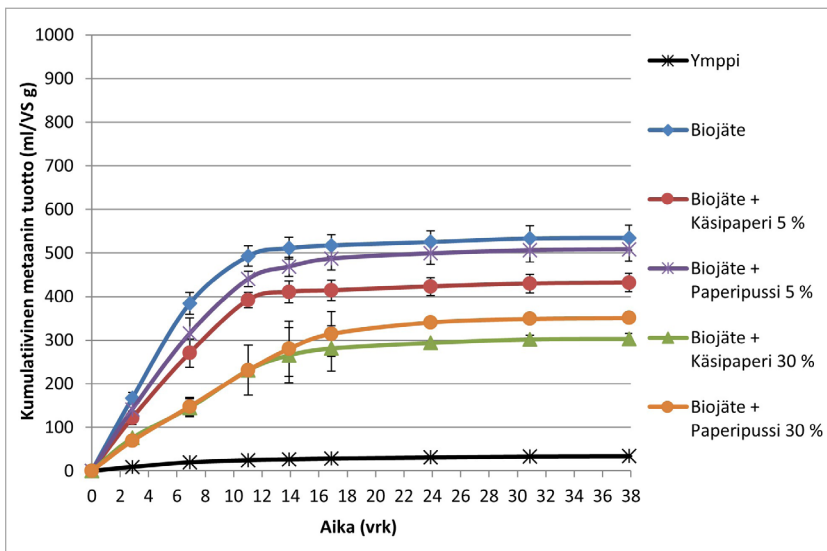


muodostui kelluva paperipallo, joka ei manuaalisella käsisekoituksella suostunut hajoamaan.

Kaasutuloksista nähtiin, että biojätteen mukana tuoma paperi heikentää biokaasun ja metaanin tuotantoa (kuvat 6–7). Pelkälle biojätteelle määritettiin kaasun maksimimetaanipitoisuudeksi 73 prosenttia. Tähän ei yltänyt ainutkaan paperia sisältänyt reaktori, vaan näiden maksimimetaanipitoisuudet olivat 57–71 prosenttia.



KUVA 6. Biojätteen seassa kulkeutuvan käsipaperin ja paperipussin vaikutus biokaasuntuotantoon laboratoriomittakaavassa (kuvat Tiina Saario).



KUVA 7. Biojätteen seassa kulkeutuvan käsipaperin ja paperipussin vaikutus metaanin tuotantoon laboratoriomittakaavassa (kuvat Tiina Saario).

Paperipussin kanssa viiden prosentin määrä tiputti metaanintuottopotentiaalia seitsemän prosenttia ja isommalla määrällä 36 prosenttia (taulukko 2). Käsipaperin kanssa vaikutus on vielä suurempi. Viiden prosentin paperimäärä tiputti metaanipotentiaalia 21 prosenttia ja suurempi, 30 prosentin määrä tiputti 45 prosenttia. Harvemmin biojäte kuitenkaan sisältää näin suurta määrää paperia, vaan pitoisuus on todennäköisimmin lähempänä viittä prosenttia tai sen alle.

**TAULUKKO 2.** Laboratoriomittakaavan panoskokeissa määritetyt biokaasu- ja metaanintuottopotentiaalit (<sup>a</sup> Ranta-Korhonen ym. 2018, <sup>b</sup> Achinas & Euverink 2019, <sup>c</sup> Huovari ym. 2008, Lehtomäki ym. 2007, <sup>d</sup> Luste ym. 2012).

Tyyppi	Menetelmä	Tuottopotentiaali raaka-aineen org. aineeseen suhteutettuna		Tuottopotentiaali raaka-aineen kokonaisuudessaan suhteutettuna	
		Biokaasu m <sup>3</sup> BG/tVS	Metaani m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /tVS	Biokaasu m <sup>3</sup> BG/t	Metaani m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /t
Biojäte	Pullokokeet	782 (755–810)	501 (480–521)	184 (177–190)	118 (113–122)
	Kirjallisuus	430–920 <sup>a, b</sup>	450–600 <sup>a, c</sup>	–	100–150 <sup>d</sup>
Biojäte + Käsipaperi 5 %	Pullokokeet	688 (642–735)	398 (383–413)	185 (172–197)	107 (103–111)
Biojäte + Käsipaperi 30 %	Pullokokeet	468 (452–497)	276 (268–290)	187 (180–198)	110 (107–115)
Biojäte + Paperipussi 5 %	Pullokokeet	758 (707–810)	465 (445–495)	204 (190–218)	125 (120–133)
Biojäte + Paperipussi 30 %	Pullokokeet	584 (551–618)	317 (303–332)	234 (221–248)	127 (121–133)

# LÄHTEET

*Achinas S. & Euverink G. J. W.* 2019. Elevated biogas production from the anaerobic co-digestation of farmhouse waste: Insight into the process performance and kinetics. *Waste management* 12, 1240–1249. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://doi.org/10.1177/0734242X19873383> [Viitattu 13.11.2023].

*Huovari, N., Rautanen, J. & Wihersaari, M.* 2008. Biokaasulaitosten energiatase maatalojen biomassoja hyödyntävissä laitoksissa. Motiva Oy. PDF-dokumentti. Saatavissa: [https://www.motiva.fi/files/4005/Biokaasulaitosten\\_energiatase\\_maatalojen\\_biomassoja\\_hyodyntavissa\\_laitoksissa.pdf](https://www.motiva.fi/files/4005/Biokaasulaitosten_energiatase_maatalojen_biomassoja_hyodyntavissa_laitoksissa.pdf) [Viitattu 13.11.2023]

*Lehtomäki, A.* 2006. Biogas production from energy crops and crop residues. Jyväskylän yliopisto. Bio- ja ympäristötieteiden laitos. Väitöskirja. Jyväskylä Studiens in Biological and Environmental Science 163. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://jyx.jyu.fi/bitstream/handle/123456789/13152/9513925595.pdf> [viitattu 13.11.2023]

*Luste, S., Seppäläinen, S. & Soininen, H.* 2013. Etelä-Savossa saatavilla olevien orgaanisten materiaalien soveltuvuus biokaasulaitoksen raaka-aineeksi – metaanintuottopotentialit, yhteismädätys ja hygienia. Teoksessa *livonen, S., Jäppinen, E., Laihanen, M., Luste, S., Nykänen, A., Ranta-Korhonen, T., Seppäläinen, S., Seuri, P., Soininen, H., Tontti, T. & Väisänen, H.-M. (toim.) Energiaomavarainen Maatila*. Helsingin yliopiston julkaisusarja – Julkaisuja 29. Helsingin yliopisto Ruralia-instituutti, 27–40. PDF-dokumentti. Saatavissa <https://helda.helsinki.fi/server/api/core/bitstreams/527d2ddf-b2c2-4d6a-b7aa-bd0902e01607/content> [Viitattu 13.11.2023].

*Luste, S., Soininen, H., Ranta-Korhonen, T., Seppäläinen, S., Laitinen, A. & Tervo, M.* 2012. Biokaasulaitos osana energiaomavaraista maatilaa. Mikkelin ammattikorkeakoulu – tutkimuksia ja raportteja 75. Mikkelin ammattikorkeakoulu.

*Ranta-Korhonen, T., Soininen, H., Saario, T. & Särkkä, H. 2018.* Lääke- ja kemikaalijäämien vaikutus biokaasuntuotantoon. Teoksessa Soininen, H., Haatanen, N. & Pulkkinen, L. (toim.) *Metsä, ympäristö ja energia – Soveltavaa tutkimusta ja tuotekehitystä – Vuosijulkaisu 2018.* Xamk kehittää 61. Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, 43–54.

*Saario, T. & Mörsky, S. 2019.* Biokaasulaitosten monitorointi Suomessa ja ulkomailla. Teoksessa Soininen, H., Haatanen, N. & Pulkkinen, L. (toim.) *Metsä, ympäristö ja energia – Soveltavaa tutkimusta ja tuotekehitystä. – Vuosijulkaisu 2019.* Xamk kehittää 101. Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, 76–82.

*Saario, T., Soininen, H. & Hiltunen, Y. 2020.* Biokaasuprosessin optimointi älykästä monitorointia kehittämällä. Teoksessa Kopra, R. (toim.) *GasOpti – Kaasujen hallinnan älykkäät sovellukset biojalostamo- ja vesiprosesseissa.* Xamk kehittää 113. Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, 79–84.

*Vrins, M. & Constenoble, O. 2019.* Standard and Regulations for the Bio-based Industry STAR4BBI - Report on standardization proposals delivered and impacts realised. Horizon 2020 -hanke. PDF-dokumentti. Saatavissa: [https://www.star4bbi.eu/app/uploads/sites/11/2019/09/STAR-4BBI\\_D5.4-Standardization-proposals-impacts.pdf](https://www.star4bbi.eu/app/uploads/sites/11/2019/09/STAR-4BBI_D5.4-Standardization-proposals-impacts.pdf) [Viitattu 13.11.2023].

# MÄDÄTEPOHJAISTEN KIERRÄTYSLANNOITTEIDEN VAATIMUKSET

Arttu Lehikoinen & Salla Pulliainen & Hanna Hänninen

Kierrätyslannoitteet ovat erilaisista kierrätettävistä sivuvirroista, kuten yhdyskuntien biojätteistä ja puhdistamolietteistä, valmistettuja lannoitteita. Näitä raaka-aineita ei kuitenkaan sellaisenaan luokitella lannoitevalmisteksi, vaan ne tulee ensiksi prosessoida esimerkiksi kompostoimalla tai biokaasuprosessin yhteydessä. (Karimaa & Kivelä 2020, 4) Kierrätyslannoitteiden laatua ja käyttöä ohjataan niin EU:n kuin kansallisellakin tasolla. Lisäksi Suomessa on kehitetty Laatulannoite-järjestelmä, jonka tavoitteena on tehostaa ravinteiden turvallista kierrätystä.

## Mädäte lannoitteen raaka-aineena

Biokaasuprosessin anaerobisessa mädätyksessä raaka-aineet hajoavat mikrobien avulla muodostaen biokaasua sekä mädätysjäännöstä. Tämä mädätysjäännös sisältää kaikki prosessiin syötetyt ravinteet ja jopa lisää kasvien käyttöön soveltuvan liukoisen typen määrää mineralisoimalla osan syötteessä olevasta orgaanisesta tyypestä. Mädätejäännös soveltuu sen vuoksi käytettäväksi lannoitteena tai maanparannusaineena. Sen lannoitekelpoisuutta ja käytön helpottamista varten mädätejäännöksen nestejäte ja kuivajäte voidaan separoida ja edelleen jatkojalostaa halutuilla menetelmillä sen ominaisuuksien parantamiseksi. (Horn ym. 2020, 11–12)

Mädätejäännös ja muut kierrätyslannoitteet sisältävät usein laajan kirjon erilaisia ravinteita, jotka voivat poiketa viljelykasvien tai maanparannusympäristön tarpeista. Runsaan ravinnepitoisuuden lisäksi mädäte voi sisältää useita erilaisia haitta-aineita. Näihin voidaan lukea muun muassa metalleja, POP-yhdisteitä, lääkeaineita, eri kemikaaleja ja taudinaiheuttajia. Biokaasureaktorin mädätejäännökselle yksi parhaista käyttötarkoituksista on kuitenkin lannoitekäyttö, sillä mädäte yleisemmin sisältää suuria määriä lannoitteiden primaareja ravinteita, kuten typpeä ja fosforia sekä hivenaineita. (Kymäläinen & Pakarinen 2015, Äystö ym. 2022)

Ravinnepitoisuuksiin ja muihin mädätteen ominaisuuksiin voivat vaikuttaa käytettävien raaka-aineiden laatu, biokaasuprosessin olosuhteet ja kuormitus sekä viipymä ja prosessissa käytetyt teknologiat. Biokaasulaitosten syötepanospohjaisen toiminnan vuoksi myös eri kierrätyslannoite-erät voivat erota toisistaan ravinnepitoisuuksien ja muiden ominaisuuksien perusteella. (Horn ym. 2020, 14, Palkamo 2021, 10) Laissa asetettujen lannoitelaatuvaatimusten, peltojen lannoittamiseen liittyvien vaatimusten sekä kierrätysravinteiden kasvavan käytön vuoksi kierrätyslannoitteiden seuranta ja testausmenetelmien kehittäminen onkin tärkeää.

## Lainsäädäntö

Kierrätyslannoitteiden laatua, turvallisuutta ja lainmukaisuutta valvotaan muun muassa EU:n lannoitevalmisteasetuksella (2019/1009), lannoitelaililla 711/2022 sekä 11.10.2023 voimaan tulleilla maa- ja metsätalousministeriön asetuksella lannoitevalmisteista 964/2023 sekä lannoitevalmisteita koskevasta toiminnan harjoittamisesta ja sen valvonnasta 965/2023. Näillä voimaan tulleilla asetuksilla kumotaan MMM:n asetukset 24/11 ja 11/12. Siirtymäaika MMMa 24/11 mukaisesta tuotannosta maa- ja metsätalousministeriön asetuksen lannoitevalmisteista 964/2023 mukaiseen tuotantoon päättyy 31.12.2023, ja niiden myyntiaika päättyy 31.12.2024.

## Kierrätyslannoitteiden laadunhallinta

Kierrätysravinteiden laadunhallintaan on Suomen Biokierto ja Biokaasu ry:n sekä Suomen Vesilaitosyhdistys ry:n toimesta kehitetty Laatulannoite-laatujärjestelmä. Järjestelmän tavoitteena on tehostaa ravinteiden turvallista ja tehokasta kierrätystä sekä palvella lannoitevalmistajien käyttäjiä, tuottajia ja viranomaisia. Kierrätysravinteista valmistetuille tuotteille voidaan myöntää Laatulannoite-järjestelmän mukainen sertifikaatti, jonka avulla kierrätyslannoitteiden valmistajat voivat osoittaa tuotteidensa täyttävän lainsäädäntöä korkeammat laatuvaatimukset. (Laatulannoite-laatu-järjestelmä kierrätyslannoitevalmisteille.)

Laatulannoite-järjestelmää koskevat menettelyt ja säännöt on kuvattu Suomen Biokierto ja Biokaasu ry:n koostamassa, 11.9.2020 voimaan tullessa Laatukäsikirjassa. Laatukäsikirjassa määritellään laatu-järjestelmän tavoitteet, soveltamisalue ja periaatteet sekä laatu-merkin hakemista ja ylläpitoa koskevat asiat (Suomen Biokierto ja Biokaasu ry).

Laatulannoite-sertifikaatti vaatii ilmoittamaan lannoitetuotteista muun muassa ravinnepitoisuuksia, fyysisiä ja kemiallisia parametrejä sekä vuosittain analysoituna seuraavat haitta-aineet: PAH<sub>16</sub>-, PCB- sekä perfluorattujen yhdisteiden (PFOS ja PFOA), lääkeaineiden (triklosaani, diklofenaakki, fluorokinoloni), bromattujen palonestoaineiden (PBDE), DEHP:n, dioksiinien ja furaanien pitoisuudet. Lisäksi tulee ilmoittaa myös lääkeaineiden pitoisuudet. Lääkeaineista on listattu vain kolme esimerkiksi: triklosaani, diklofenaakki ja fluorokinoloni. Raja-arvoja edellä mainituille haitta-aineille ei kuitenkaan ole asetettu PAH<sub>16</sub>-yhdistettä lukuun ottamatta. Laatulannoitesertifikaatti ei vaadi mikromuovien määrittystä standardianalyysien puutteen vuoksi.

## Kierrätyslannoitteiden vaatimukset

Suomessa kierrätyslannoitteiden, kuten muidenkin lannoitteiden kohdalla, toimija voi itse päättää, valmistaako kansallisia lannoitevalmisteita vai EU-vaatimusten mukaisia lannoitteita (Valtioneuvosto 2023). Pääasiallisena vaatimuksena on kuitenkin, etteivät lannoitevalmisteet saa sisältää sellaisia määriä haitallisia aineita, yhdisteitä tai eliöitä, että niiden käytöstä voisi aiheutua vaaraa ihmisten tai eläinten terveydelle, turvallisuudelle, kasvien terveydelle tai ympäristölle (lannoitelaki 711/2022, 5 § mom. 2).

EU:n asetuksessa lannoitevalmisteille on lueteltu tuotevaatimukset toimintaperusteisen tuoteluokan sekä raaka-aineiden perusteella. Kierrätyslannoitteet voidaan kategorisoida muun muassa orgaanisiksi tai epäorgaanisiksi lannoiteiksi, maanparannusaineiksi sekä kalkitusaineiksi riippuen käytetystä jakeesta (Seppänen ym. 2018, 4).

Lannoitevalmisteasetuksen ensimmäisen liitteen toisessa osassa on lueteltu tuoteluokan (PFC) mukaan yleisempiä lannoitteelle annettuja vaatimuksia sekä tarkempia vaatimuksia esimerkiksi lannoitetyypin nestemäisille ja kuiville versioille erikseen (Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EU) 2019/1009, liite 1). Kansallisessa lainsäädännössä lannoitevalmisteille on annettu laatu- ja turvallisuusvaatimuksia, jotka koskevat muun muassa haitallisten aineiden pitoisuuksia ja hygieniavaatimuksia. Näiden lisäksi tulee huomioida lannoitteiden fosforipitoisuuden mukaan määräytyvät kadmiumpitoisuuksien rajoitukset. Lannoitevalmisteissa ei saisi myöskään esiintyä kasvintuhoojia. (Ruokavirasto 2023 a) Lannoitteiden virallinen laadunvalvonta edellyttää Ruokaviraston tai sen hyväksymien laboratorioden analytiikkaa (Lannoitevalmisteiden laboratorioanalytiikka 2023).

## Lannoitteiden haitta-ainerajoitukset

Lannoitetuotteet voidaan jakaa markkina-alueen mukaan kahteen kategoriaan: pelkästään Suomessa markkinoitaviin lannoitteisiin sekä CE-merkittyihin EU:n alueella markkinoitaviin lannoitevalmisteisiin. Näistä kummankin markkina-alueen kategoria jakaa tuotteet tuoteluokkiin ja ainesosaluokkiin. Tuoteluokat määrittävät vaatimukset tuotteiden toiminnolle eli tuotteen käyttötarkoitukselle ja ominaisuuksille. Tuoteluokille on määriteltä ainesosaluokat, joista eri tuoteluokkien mukaiset lannoitevalmisteet saavat koostua.

CE-merkityt lannoitevalmisteet jaetaan seitsemään eri tuoteluokkaan: lannoitteisiin, kalkitusaineisiin, maanparannusaineisiin, kasvualustoihin, inhibiittoreihin, kasvibiostimulantteihin sekä lannoitevalmisteiden mekaanisiin seoksiin. Näihin tuoteluokkiin sovelletaan 15 ainesosaluokkaa, joissa on lueteltu niissä sallitut raaka-aineet ja käsittelyä vaativien raaka-aineiden osalta vaatimukset käsittelymenetelmille. CE-merkityissä lannoitevalmisteissa mädätteet jaetaan kahteen eri ainesosaluokkaan: luokan 4 tuorekasvimädätteisiin ja luokan 5 muihin kuin tuorekasvimädätteisiin. (Ruokavirasto 2022)

Kansallisella tasolla lannoitevalmisteet jaetaan kuuteen eri tuoteluokkaan: lannoitteisiin, kalkitusaineisiin, maanparannusaineisiin, kasvualustoihin, biostimulantteihin sekä lannoitevalmisteiden seoksiin. Lisäksi lannoitteet on jaettu vielä tarkemmin orgaanisiin ja epäorgaanisiin luokkiin ominaisuuksiensa perusteella. Lannoitevalmisteiden kansallisia ainesosaluokkia on 11, ja mädäte kuuluu ainesosaluokkaan 4. (Ruokavirasto 2023 b)

Jokaiseen markkinoitavaan lannoitetuotteeseen pätee markkinointialueen mukaan yksi ainesosa- ja yksi tuoteluokka sekä sen mukaiset raja-arvot. CE-merkittyjen tuotteiden, joita myydään tai valmistetaan Suomen alueella, tulee täyttää myös kansallisen lainsäädännön vaatimukset. Suomen alueen raja-arvot ovat yleisesti EU:n alueen rajoitusten kanssa samalla tasolla, mutta osa CE-merkittyjen lannoitteiden vaatimuksista on Suomen lainsäädäntöä tiukempia.

Tiukemmista rajoituksista esimerkkeinä käyvät EU:n lannoitteiden mädätteiden syötekoostumuksen rajoitukset ainesosaluokissa sekä kiinteiden epäpuhtauksien määrä lannoitevalmisteissa. Suomen alueen lannoitteissa metallien pitoisuudet ovat yleisesti hieman EU:n alueella markkinoitavia pienemmillä raja-arvoilla. Sekä EU:n että Suomen lainsäädännön mukaan mädätepohjaiset lannoitetuotteet tulee hygienisoida, käsitellä termofiilisessä prosessissa tai kompostoida ennen markkinointia.



## Kansallisen lainsäädännön mukaiset ainesosaluokan 4 haitta-ainerajat mädätteille

Kansallisessa lainsäädännössä mädäte kuuluu ainesosaluokkaan 4. Mädätepohjaisten lannoitteiden maa- ja metsätalousministeriön asetuksen lannoitevalmisteista 964/2023 liitteen 2 ainesosaluokan 4 mukaiset haitta-ainerajat ovat seuraavat:

- Mädätteen lämpötila-aikaprofiili pitää vastata yhtä seuraavista:
  - Termo- tai mesofiilinen mädätys ja hygienisointi (70 °C, 1 h), palakoko ≤12 mm
  - Termofiilinen mädätys väh. 55 °C, keskimääräinen hydraulinen viipymä (mädätysaika) 20 päivää
  - Termo- tai mesofiilinen mädätys ja kompostointi lannoitelain 711/2022 ainesosaluokan 3: komposti käsittelyvaatimusten mukaisesti
- Mädätteen kiinteän ja nestemäisen osan on täytettävä 1.1.2027 alkaen vähintään toinen seuraavista kriteereistä:
  - Hapenottokyky ≤ 25 mmol O<sub>2</sub>/ kg org. ainesta/h
  - Biokaasujäännöspotentiaali: enintään 0,25 l biokaasua/VS
- Lannoitteeksi, lannoitteen osaksi tai kasvualustaksi päätyvä mädäte
  - Kasvivaste vähintään 70 %
- Mädäte saa sisältää epäpuhtauksia (lasi, metalli, muovi) 31.12.2027 asti:
  - Yli 2 mm:n epäpuhtauksia 5 g/kg k.a.
  - Kaikenkokoisia epäpuhtauksia 10 g/kg k.a.
- Mädäte saa sisältää epäpuhtauksia (lasi, metalli, muovi) 1.1.2028 alkaen:
  - Yli 2 mm:n epäpuhtauksia 2,5 g/kg k.a.
  - Kaikenkokoisia epäpuhtauksia 5 g/kg k.a.
- Mädätteen kiinteä ja nestemäinen osa saa sisältää taudinaiheuttajia enintään
  - *Salmonella spp*: ei todettavissa 25 g:ssa tai ml:ssa näytettä
  - *E. coli*: 1000 pmy/g tai ml
  - *Enterococcaceae*: 1000 pmy/g tai ml

Yllä mainittujen kriteerien lisäksi mädätepohjaisten lannoitteiden tulee täyttää lannoitelain 711/2022 liitteen 1 mukaiset haitta-ainerajat. Rajat riippuvat mädätelannoitteen markkinoitavasta tuoteluokasta, joita on kymmenen erilaista. Yleisesti tuoteluokille pätevät seuraavat rajat:

- Tuoteluokat 1B ja 1C1: Kadmiumpitoisuus 50 mg/kg fosforia, jos tuotteessa on yli 2,2 % fosforia

- Taudinaiheuttajia enintään ym. ainesosaluokan 4 mukaisesti
- Epäpuhtauksia enintään ym. ainesosaluokan 4 mukaisesti
- Taulukon 1 mukaiset raja-arvot metalleille

**TAULUKKO 1.** Lannoitteiden tuoteluokkakohtaiset metallipitoisuuksien raja-arvot, yksikkö mg/kg kuiva-ainetta (maa- ja metsätalousministeriön asetus lannoitevalmisteista 964/2023, Ruokavirasto b. 2023).

Metalli	Tuoteluokka									
	1A	1B	1C1	1C2	1C3	2	3A	3B	4	5
As	40	40	40	60	40	40	40	40	10	40
Hg	1	1	1	2	1	1	1	1	0,5	1
Cd	1,5	1,5	1,5	3	25	1,5	1,5	1,5	1	1,5
Cr	300	300	300	600	300	400	300	300	200	300
Cu	600	600	600	600	600	600	600	600	150	300
Pb	100	100	100	200	150	100	100	100	50	100
Ni	70	70	70	150	120	70	70	70	50	70
Zn	1500	1500	1500	1500	4500*	1500	1500	1500	300	1500

\*Sinkin enimmäismäärä voi ylittyä 6 000 mg/kg k.a. asti, jos sinkin puute on todettu kasvustosta maaperä-, neulas- tai lehtianalysillä.

Lisäksi kullekin tuoteluokalle voi olla tuoteluokkakohtaisia poikkeuksia. Poikkeukset tulee tarkistaa maa- ja metsätalousministeriön asetuksen lannoitevalmisteista 964/2023 liitteestä 1.

## CE-merkittyjen lannoitteiden haitta-ainerajat

Suomessa ja muualla EU:ssa markkinoitavat CE-merkityt mädättepohjaiset lannoitteet noudattavat EU-lannoitevalmisteasetuksen (2019/1009) liitteen 2 mukaisia rajoja. Ainesosaluokka (CMC) 4 koskee tuorekasvi-mädätettä ja sisältää seuraavat rajoitukset:

- Mädätteen lämpötila-aikaprofiilin pitää vastata yhtä seuraavista:
  - Termo- tai mesofiilinen mädätys ja hygienisointi (70 °C, 1 h), palakoko ≤12 mm
  - Termofiilinen mädätys väh. 55 °C:ssa 24 h:n ajan, keskimääräinen hydraulinen viipymä (mädätysaika) 20 päivää
  - Termo- tai mesofiilinen mädätys ja kompostointi 55–70 °C:ssa 14–3 päivän ajan (korkeampi lämpötila = lyhyempi kompostointiaika)

- Mädätteen kiinteän ja nestemäisen osan on täytettävä toinen seuraavista kriteereistä:
  - Hapenottokyky  $\leq 25$  mmol O<sub>2</sub>/ kg org. ainesta/h
  - Biokaasujäännöspotentiaali: enintään 0,25 l biokaasua/g VS
- Syötteenä käytetään kasveja, kasvinosia tai levää. Syötteenä ei saa käyttää sinilevää.
- Biokaasulaitoksessa syötemateriaalit eivät ole fyysisessä kosketuksessa muihin kuin yllä mainittuihin syötemateriaaleihin, eivätkä syötemateriaalit ja tuotosmateriaali pääse fyysiseen kosketukseen missään vaiheessa.
- Mädate sisältää mädätyslisäaineita enintään viisi prosenttia panosmateriaalien painosta, ja lisäaineet on rekisteröity (EY) N:o 1907/2006 (alla asetus) nojalla asiakirja-aineistoon, joka sisältää asetuksen liitteiden VI, VII ja VII mukaiset tiedot, asetuksen 14 artiklan mukaisen kemikaaliturvallisuusraportin, ellei sitä ole vapautettu asetuksen liitteessä IV tai asetuksen liitteessä V olevassa 6, 7, 8 tai 9 kohdassa.

Ainesosaluokka (CMC) 5 koskee muita kuin tuorekasvimädätteitä ja sisältää seuraavat rajoitukset:

- Mädätteen syötteeseen on käytetty direktiivin 2008/98/EY mukaisista erilliskerättyä biojätettä jätteen syntymispaikalta.
- Syöte sisältää eläviä tai kuolleita organismeja, jotka voi olla käsitelty
  - manuaalisin, mekaanisin tai painovoimaan perustuvien menetelmin
  - veteen liottamalla, vaahdottamalla, erottamalla veden avulla, höyrytislauksella
  - lämmittämällä veden poistamiseksi
  - millä tahansa menetelmällä ilman erottamiseksi
- Syöte ei saa olla sisältänyt
  - asetuksen (EY) N:o 1069/2009 soveltamisalaan kuuluvia eläinten sivutuotteita
  - jätevesi-, teollisuus- tai ruoppauslietettä
  - sekalaisesta yhdyskuntajätteestä saatavia materiaaleja
- Syöte voi sisältää kompostia EU-lannoitevalmisteasetuksen (2019/1009) liitteen 2 ainesosaluokan (CMC) 5 kohdan 1 a mukaisesti.
- Valmiste ei saa sisältää mädätettyjä, yllä mainittuja organismeja tai kiellettyjä syötteitä.
- Syötteet sisältävät  $\leq 6$  mg/kg k.a. PAH<sub>16</sub>-yhdisteitä.
- Mädätyslisäaineita ainesosaluokan (CMC) 4 mukaisesti.
- Biokaasulaitos on ainesosaluokan (CMC) 4 mukainen.
- Lämpötila-aikaprofiili on ainesosaluokan (CMC) 4 mukainen.
- Mädätteen kiinteä ja nestemäinen osa sisältävät  $\leq 6$  mg/kg k.a. PAH<sub>16</sub>-yhdisteitä.

- Määdte saa sisältää epäpuhtauksia (lasi, metalli, muovi)
  - Yli 2 mm:n epäpuhtauksia 3 g/kg k.a.
  - Kaikenkokoisia epäpuhtauksia 5 g/kg k.a.
- Määdte saa sisältää epäpuhtauksia 16.7.2026 alkaen:
  - Yli 2 mm:n epäpuhtauksia 2,5 g/kg k.a.
- Määdätteen kiinteän ja nestemäisen osan on täytettävä toinen seuraavista kriteereistä:
  - Hapenottokyky  $\leq 25$  mmol O<sub>2</sub>/ kg org. ainesta/h
  - Biokaasujäännöspotentiaali: enintään 0,25 l biokaasua/g VS

CE-merkityille lannoitteille pätee lisäksi tuoteluokkakohtaiset rajoitukset ainesosaluokan rajoitusten lisäksi. Tuoteluokkia on 20 erilaista, joiden yleisimmät yhteiset haitta-aineet ja niiden vaihteluväli on esitetty taulukossa 2. Lannoitetuotteiden rajoitukset tulee tarkastaa Euroopan parlamentin ja neuvoston asetuksesta (EU) 2019/1009. Kirjallisuudessa on myös esitetty kattavia koontitaulukoita asetuksen rajoituksista. (Äystö ym. 2022)

**TAULUKKO 2.** Osa EU:n lannoitevalmisteasetuksen (2019/1009) tuoteluokkien haitta-aineiden raja-arvoista. Taulukko ei sisällä kaikkia rajoituksia kokonaisuuden esittämisen ja selkeyden vuoksi. (Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EU 2019/1009)

Kategoria	Haitta-aine	EU/CE-merkitty lannoite
Metallit	Arseeni (As)	40–1000
	Elohopea (Hg)	1–100
	Kadmium (Cd)	200 tai 1,5–3 <sup>1</sup>
	Kromi (Cr)	400 tai 2 <sup>2</sup>
	Kupari (Cu)	200–600
	Lyijy (Pb)	120–600
	Nikkeli (Ni)	50–2000
	Sinkki (Zn)	500–1500
Taudin- aiheuttajat	Salmonella	negatiivinen / 25 g:ssa tai 25 ml:ssa
	E. coli	1000 pmy/g tai ml:ssa
	Enterokokit	1000 pmy/g tai ml:ssa
Epä- puhtaudet	Lasi, metalli, muovi, raekoko >2 mm	3/2,5 g/kg <sup>3</sup>
	Lasi, metalli, muovi yhteensä	5 g/kg
POP- yhdisteitä	PAH <sub>16</sub>	6,0
	PCDD/PCDF-yh- disteet	20 ng TEQ/kg k.a.

<sup>1</sup> Kadmiumin määrä fosforiin on rajoitettu 60 mg/fosforikiloa kohti, kun lannoitteessa on yli 2,2 massaprosenttia fosforia (5 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>).

<sup>2</sup> Kuudenarvoinen kromi (Cr VI)

<sup>3</sup> Raja pienentyy 16.7.2026 alkaen. Korkeammat pitoisuudet ovat voimassa 15.7.2026 asti.

## Jätevesipohjaisten lannoitteiden laatuksiteerit

Jätevesilietteen käytölle maanviljelyssä on omia rajoituksiaan. Maa- ja metsätalousministeriön asetuksen lannoitevalmisteista 964/2023 liitteessä 5 on esitetty viljelysmaan maaperän metallipitoisuuksien rajat, kun lannoitteena on käytetty yli 90 prosenttia sisältävää jätevesipohjaisia mädätelannoitteita. Nämä rajat on esitetty taulukossa 3. Lisäksi EU:n lietedirektiivi 86/278/ETY (neuvoston direktiivi, annettu 12 päivänä kesäkuuta 1986, ympäristön, erityisesti maaperän, suojelusta käytettäessä puhdistamolietettä maanviljelyssä (86/278/ETY)) liitteessä 1 A on esitetty jätevesilietettä levitetyille viljelysmaalle rajoitukset. Direktiivin liitteessä 1 B on esitetty levitettävälle jätevesilietteelle rajoitukset. Nämä rajoitukset on esitetty taulukossa 3. Lisäksi direktiivin liitteessä 1 C on jätevesiviljelysmaalle vuosittain kymmenen vuoden ajanjaksolle tehtäville raskasmetallien pitoisuuksien seurannalle rajoitukset.

**TAULUKKO 3.** Jätevesilannoitetta käytettyjen viljelysmaiden ja jätevesilietteen haitta-aineiden raja-arvot (1 maa- ja metsätalousministeriön asetus lannoitevalmisteista 964/2023, liite 5, 2 EU:n lietedirektiivi 86/278/ETY liite 1 A, 3 EU:n lietedirektiivi 86/278/ETY liite 1 B).

Haitta-aine	Maaperän rajoitukset <sup>1</sup>	Lietteen rajoitukset
Elohopea (Hg)	0,2 <sup>1</sup> ja 1–1,5 <sup>2</sup>	16–25 <sup>3</sup>
Kadmium (Cd)	0,5 <sup>1</sup> ja 1–3 <sup>2</sup>	20–40 <sup>3</sup>
Kromi (Cr)	100 <sup>1</sup>	-
Kupari (Cu)	100 <sup>1</sup> ja 50–140 <sup>2</sup>	1000–1750 <sup>3</sup>
Lyijy (Pb)	60 <sup>1</sup> ja 50–300 <sup>2</sup>	750–1200 <sup>3</sup>
Nikkeli (Ni)	50 <sup>1</sup> ja 30–75 <sup>2</sup>	300–400 <sup>3</sup>
Sinkki (Zn)	200 <sup>1</sup> ja 150–300 <sup>2</sup>	2500–4000 <sup>3</sup>

Suomen ulkopuolella EU:ssa on useita maakohtaisia raja-arvoja eri haitta-aineille, joita Suomessa ei vielä toistaiseksi vaadita lannoitteista seurattavan. Näihin kuuluvat muun muassa PCB-, PFAS- (PFOS, PFOA), NPEO-, NP- (nonyylifenolietoksyylaatti ja nonyyllifenolit), LAS- (lineaariset alkyylilibentseenisulfonaatit), DEHP-, AOX-yhdisteet, bromatut palonestoaineet (PBDE) sekä öljyhiilivedyt. (Äystö ym. 2022) EU:n POP-asetuksessa (Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EU) 2019/1021) on lisäksi asetettu muun muassa bromatuille palonestoaineille ja PFOS- sekä PFOA-yhdisteille raja-arvo tahattomalle POP-yhdisteiden pitoisuudelle, joita voi soveltaa lannoitetuotteissa. (Äystö ym. 2022)

## XRF-menetelmä mädätepohjaisten lannoitteiden tutkimisessa

XRF:n eli röntgenfluoresenssispektrometrin käyttö on noussut kierrätyslannoitteita käsittelevissä tutkimuksissa mielenkiinnon kohteeksi. Röntgenfluoresenssispektrometrillä voidaan tehdä nopeita laadullisia ja määrällisiä alkuaineanalyyskejä useista erilaisista näytematriiseista. Tyypillisesti XRF:ää on käytetty maaperänäytteiden tutkimiseen, mutta sitä on mahdollista soveltaa myös muihin ympäristötutkimuksen tarpeisiin. (Marquí ym. 2022)

XRF:n toiminta perustuu näytteen säteilyttämiseen korkeaenergisillä röntgensäteillä 0,01–10 nm:n aallonpituusalueella (Horf ym. 2021). Röntgenfluoresenssispektrometria kattaa alleen erilaisia laitteita, kuten kannettavia pXRF-laitteita (portable XRF) sekä mikro-XRF-laitteita (Marquí ym. 2022, 3). XRF-menetelmässä analysoidut näytteet tulee valmistella oikein luotettavien tulosten saamiseksi. Mittausmahdollisuuksiensa, nopeutensa ja kannettavuutensa vuoksi XRF-menetelmät voisivat toimia vaihtoehtona perinteisten laboratorioanalyysien ohella kierrätyslannoitteiden tutkimisessa.

XRF-menetelmän soveltuvuutta mädätteiden haitta-aineiden mittaamiseen on testattu useissa tutkimuksissa. Tutkimusten perusteella XRF voi toimia biokaasumädätteen tutkimisessa, mutta luotettavan tuloksen saaminen edellyttää näytteen kuivattamista ja jauhamista (Horf ym. 2021, 10). Lisäksi XRF-menetelmää on testattu esimerkiksi pelletöidyn ja nestemäisen lantaperäisen mädätteen lannoitekelpoisuuden mittaamisessa (Valentinuzzi ym. 2020).

XRF-menetelmän hyödyntämistä on pohdittu viime vuosina myös tavanomaisten lannoitteiden ja muiden näytematriisien testauksessa. Vaikka analyysikohteena eivät suoraan ole olleet mädätteet, voivat tutkimushavainnot, koeasettelut sekä tulokset olla sovellettavissa biokaasuprosessissa syntyvien jakeiden lannoitekelpoisuuden tutkimiseen. Esimerkiksi Wissmann (2019) analysoi tutkimuksessaan EDXRF-spektrometrillä kasvimateriaaleja ja lannoitteita. Tutkimuksen perusteella havaittiin XRF:n olevan soveltuva menetelmä ravinteiden ja hivenaineiden määrittämiseen. Toinen XRF-tutkimus käsitteli tarkemmin XRF:n kalibrointia ja luotettavuuden määrittämistä sekä edeltävien tutkimusten tavoin XRF:n kelpoisuutta lannoitteiden tutkimiseen. Tutkimus tuli samoihin johtopäätöksiin muiden tutkimusten kanssa siitä, että XRF pystyy mittamaan lannoitteiden alkuaineita hyvällä tarkkuudella ja voisi siten olla hyvä laite raaka-aineiden ja tuotteiden testauksessa. (Acquah ym. 2022)

XRF-menetelmä voisi olla käytettävissä oleva mittausmenetelmä peruslannoitteiden, mutta myös biokaasuprosessissa syntyvän mädätteen lannoitekelpoisuuden testaamiseen. Menetelmä voisi olla sovelias niin jatkojalostettujen kierrätyslannoitteiden kuin myös käsittelemättömien mädätejakeiden analysoimiseen. XRF-laitteiden kannettavuus ja käyttömahdollisuudet tekisivät siitä nopean ja hyvän työkalun laboratorioympäristön lisäksi mahdollisesti myös prosessilaitoksilla.

# LÄHTEET

*Acquah, G.E., Hernandez-Allica, J., Thomas, G.L., Dunham, S.J., Towett, E.K., Drake, L.B., Shepherd, K.D., McGrath, S.P. & Haefele, S.M. 2022. Port-able X-ray fluorescence (pXRF) calibration for analysis of nutrient concentrations and trace element contaminants in fertilisers. PLOS ONE. PDF-dokumentti. Päivitetty 11.1.2022. Saatavissa: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0262460> [viitattu 27.3.2023].*

*Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EU) 2019/1009.*

*Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EU) 2019/1021.*

*Horf, M., Gebbers, R., Vogel, S., Ostermann, M., Piepel, M.F. & Olf, H.W. 2021. Determination of Nutrients in Liquid Manures and Biogas Digestates by Portable Energy-Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometry. *Sensors* 21. PDF-dokumentti. Päivitetty 4.1.2021. Saatavissa: <https://doi.org/10.3390/s21113892> [viitattu 28.7.2023].*

*Horn, S., Seppänen, A.R., Winquist, E., Lehtoranta, S. & Luostarinen, S. 2020. Biokaasulaitoksen mädätysjäännöksen hyödyntämismavaihtoehtojen ilmastovaikutukset ja taloudellisuus. Suomen ympäristökeskus. PDF-dokumentti. Saatavissa: [https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/321266/SYKEra\\_42\\_2020\\_BioRaEE.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/321266/SYKEra_42_2020_BioRaEE.pdf?sequence=1&isAllowed=y) [viitattu 14.2.2023].*

*Karimaa, E. & Kivelä, J. 2020. Luomutuotantoon soveltuvat kierrätyslannoitteet - katsaus Suomen ja EU:n markkinoilla oleviin tuotteisiin. PDF-dokumentti. Saatavissa: [https://blogs.helsinki.fi/hykerrys-hanke/files/2020/01/Raportti\\_Luomutuotantoon-soveltuvat-kierr%C3%A4tyslannoitteet.pdf](https://blogs.helsinki.fi/hykerrys-hanke/files/2020/01/Raportti_Luomutuotantoon-soveltuvat-kierr%C3%A4tyslannoitteet.pdf) [viitattu 15.2.2023].*

*Kymäläinen, M. & Pakarinen, O. 2015. Biokaasuteknologia: Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen. HAMKin e-julkaisuja 36/2015, HAMKin julkaisuja 17/2015. Hämeen ammattikorkeakoulu. E-kirja. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-951-784-771-1> [viitattu 16.11.2023]*



*Laatukäsikirja: Kansallinen laatujärjestelmä kierrätyslannoitevalmistel-  
le.* Versio 2.1. 2020. Laatulannoite. PDF-dokumentti. Päivitetty 11.9.2020.  
Saatavissa: [https://laatulannoite.fi/wp-content/uploads/2021/04/Laatuka-  
sikirja\\_versio-2.1\\_korjatut-liitenumerot2.pdf](https://laatulannoite.fi/wp-content/uploads/2021/04/Laatuka-<br/>sikirja_versio-2.1_korjatut-liitenumerot2.pdf) [viitattu 15.2.2023].

*Lannoitelaki 711/2022.*

*Lannoitevalmisteiden laboratorioanalytiikka.* 2023. Ruokavirasto.  
WWW-dokumentti. Päivitetty 27.1.2023. Saatavissa: [https://www.ruoka-  
virasto.fi/kasvit/lannoitevalmisteet/valvonta/laboratorioanalytiikka/](https://www.ruoka-<br/>virasto.fi/kasvit/lannoitevalmisteet/valvonta/laboratorioanalytiikka/) [vii-  
tattu 17.2.2023].

*Maa- ja metsätalousministeriön asetus lannoitevalmisteista 964/2023.*

*Marquí, E., Queralt, I. & de Almeida, E.* 2022. X-ray fluorescence spec-  
trometry for environmental analysis: Basic principles, instrumentation,  
applications, and recent trends. *Chemosphere* 303. PDF-dokumentti.  
Päivitetty 20.5.2022. Saatavissa: [https://doi.org/10.1016/j.chemosphe-  
re.2022.135006](https://doi.org/10.1016/j.chemosphe-<br/>re.2022.135006) [viitattu 27.3.2023].

*Neuvoston direktiivi, annettu 12 päivänä kesäkuuta 1986, ympäristön,  
erityisesti maaperän, suojelusta käytettäessä puhdistamolietettä maan-  
viljelyssä (86/278/ETY).*

*Palkamo, A.* 2021. Mädätysjäännöksestä kierrätyslannoitteiksi - Case Bio-  
linja Oy. Turun ammattikorkeakoulu. Energia- ja ympäristötekniikan kou-  
lutusohjelma. Opinnäytetyö. PDF-dokumentti. Saatavissa: [https://urn.fi/  
URN:NBN:fi:amk-2021062116458](https://urn.fi/<br/>URN:NBN:fi:amk-2021062116458) [viitattu 17.2.2023].

*Ruokavirasto.* 2022. CE-merkittyjen lannoitevalmisteiden valmistus.  
www-sivu. 31.10.2022. Saatavissa: [https://www.ruokavirasto.fi/kasvit/lan-  
noitevalmisteet/eun-uusi-lannoiteasetus/Tuoteluokat\\_ja\\_ainesosaluokat/](https://www.ruokavirasto.fi/kasvit/lan-<br/>noitevalmisteet/eun-uusi-lannoiteasetus/Tuoteluokat_ja_ainesosaluokat/)

*Ruokavirasto.* 2023 a. Haitalliset aineet, taudinaiheuttajat ja epäpuhtau-  
det. WWW-sivu. 2.11.2023. Saatavissa: [https://www.ruokavirasto.fi/kasvit/  
lannoitevalmisteet/laatuvaatimukset/haitalliset-aineet-ja-hygienia/](https://www.ruokavirasto.fi/kasvit/<br/>lannoitevalmisteet/laatuvaatimukset/haitalliset-aineet-ja-hygienia/) [vii-  
tattu 15.11.2023].

*Ruokavirasto.* 2023 b. Tuoteluokat ja ainesosaluokat. WWW-sivu.  
9.11.2023. Saatavissa: [https://www.ruokavirasto.fi/kasvit/lannoitevalmis-  
teet/laatuvaatimukset/tuoteluokat-ja-ainesosaluokat/](https://www.ruokavirasto.fi/kasvit/lannoitevalmis-<br/>teet/laatuvaatimukset/tuoteluokat-ja-ainesosaluokat/)

*Seppänen, A-M., Luostarinen, S. & Pesonen, L.* 2019. Kierrätyslannoitus: Suunnittelu, käytännöt ja mahdollisuudet tulevaisuudessa. Luonnonvarakeskus (Luke). PDF-dokumentti. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-759-6> [viitattu 27.2.2023].

*Suomen Biokierto ja Biokaasu ry.* 2020. Laatukäsikirja: Kansallinen laatu-järjestelmä kierrätyslannoitevalmisteille. WWW-dokumentti. 11.9.2020. [Laatukäsikirja\\_versio-2.1.\\_korjatut-liitenumerot2.pdf](#) ([laatulannoite.fi](http://laatulannoite.fi)) [viitattu 15.11.2023]

*Valentinuzzi, F., Cavanu, L., Porfdo, C., Cesco, S., Marzadori, C. & Mimmo, T.* 2020. The fertilising potential of manure-based biogas fermentation residues: pelleted vs. liquid digestate. *Heliyon* 2. WWW-dokumentti. Päivitetty 3.2.2020. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03325> [viitattu 25.3.2023].

*Valtioneuvosto.* 2022. Uusi lannoitelaki voimaan 16.7.2022. WWW-dokumentti. Päivitetty 12.7.2022. Saatavissa: <https://valtioneuvosto.fi/-/1410837/uusi-lannoitelaki-voimaan-16.7.2022> [viitattu 27.02.2023].

*Valtioneuvosto.* 2023. EU:n uusi lannoitevalmisteasetus (2019/1009). WWW-dokumentti. Päivitetty 4.1.2023. Saatavissa: <https://www.ruokavirasto.fi/kasvit/lannoitevalmisteet/eun-uusi-lannoiteasetus/> [viitattu 17.2.2023].

*Äystö, L., Högmänder, P., Fjäder, P. & Salminen, J.* 2022. Haitalliset aineet kierrätyslannoitteissa ja niiden raaka-aineissa. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 27/2022. Helsinki: Suomen Ympäristökeskus (SYKE). E-kirja. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-11-5497-3> [viitattu 16.11.2023]

# BIOLUUPPI-DEMONSTRAATIO- YMPÄRISTÖN BIOKAASU- REAKTOREIDEN KOEAJOT

Tiina Saario & Arttu Lehikoinen & Jussi Konttila  
& Hanne Soininen

BioLuuppi – Demonstraatioympäristö kiertotalouden sivuainevirroille investointihankkeen Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun osiossa Mikkelin Metsäsairilaan rakennettiin biokaasuun keskittyvä BioLuuppi-demonstraatioympäristö. Xamkin BioLuuppi-ympäristö mahdollistaa erilaisten raaka-aineiden, prosessiolosuhteiden, sekoitusten tai esimerkiksi haitta-aineiden testaamisen biokaasuprosessissa laboratoriomittakaavaa suuremmilla reaktoreilla. Demonstraatioympäristö mahdollistaa myös täysmittakaavan laitoksia simuloivat koeajot riskimateriaaleilla ilman, että vaarannetaan laitospittakaavan reaktorin prosesseja.

## BioLuupin koeajot

BioLuupissa tehtiin vuosien 2022–2023 aikana neljä koeajoa, joista kolmessa oli käytössä märkäreaktori ja kahdessa kuivareaktori (taulukko 1). Koeajot kestivät 47 vuorokaudesta 245 vuorokauteen. Koeajojen aikana testattiin kolmea erilaista ympäristöä reaktoreiden käynnistyksessä sekä useaa erilaista syötemateriaalia.

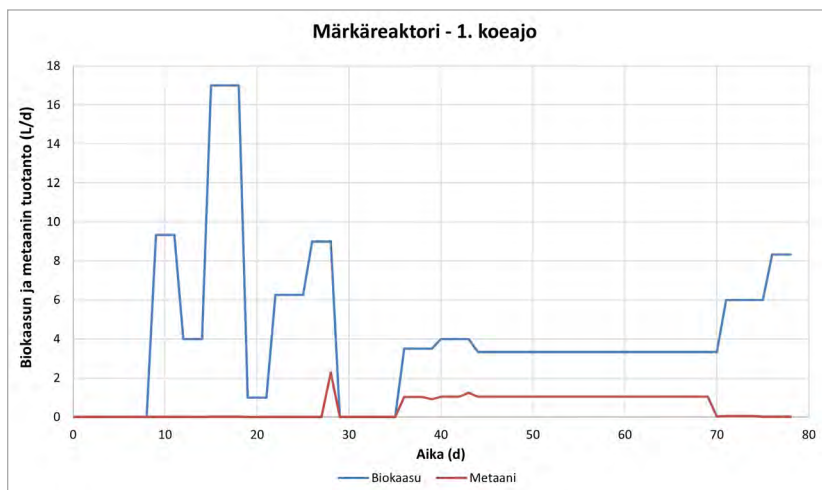
**TAULUKKO 1.** Bioluupin koeajot vuosina 2022 ja 2023.

Sarja, pvm, kesto	Reaktori	Idea	Ympäri	Syöte
1. 2.6.–19.8.2022 (78 päivää)	Märkä	Laitteiston testaus ja sisäänajo	Kuiva (jätevesi)	Laimennettu jätevesimädäte + melassi
2. 23.8.–9.12.2022 (109 päivää)	Märkä ja kuiva	Laitteiston testaus ja sisäänajo, automaation testaus	Kuiva (jätevesi)	Laimennettu jätevesimädäte + melassi Nurmirehu
3. 20.2.–23.10.2023 (245 päivää)	Kuiva	Haitta-aineiden vaikutus ja laitteiston optimointi	Kuiva	Nurmirehu + Melassi
4. 20.2.–6.7.2023 (136 päivää)	Märkä	Hygienisoimaton MBR-liete	Märkä	Melassi MBR-liete

## Ensimmäinen koeajo – märkäreaktorin käytön optimointia

Ensimmäinen koeajo Bioluupilla käynnistettiin 2.6.2022 märkäreaktorin kanssa. Koeajon aikana oli tarkoitus testata laitteiston ja sen mittausjärjestelmän toimivuutta. Reaktorin käynnistyksessä ympäriä käytettiin kuivamenetelmään pohjautuvan, jätevesilietettä syötteenä käyttävän biokaasulaitoksen laimennettua mädätettä. Reaktorien lämpötila asetettiin ensin 37 asteeseen. Syötteenä käytettiin samaa laimennettua jätevesimädätettä, jolla reaktori oli käynnistetty.

Ensimmäisen viikon jälkeen syötteen sekaan lisättiin melassia tehostamaan kaasuntuotantoa. Ensimmäisessä koeajossa syöttö- ja poistoautomaatio ei ollut vielä käytössä, vaan nämä tapahtuivat manuaalisesti monitorointikäyntien yhteydessä. Reaktori purettiin 19.8.2022, kun koeajoa oli kestänyt 78 vuorokautta. Ensimmäisen koeajon biokaasun ja metaanintuotanto on esitetty kuvassa 1.



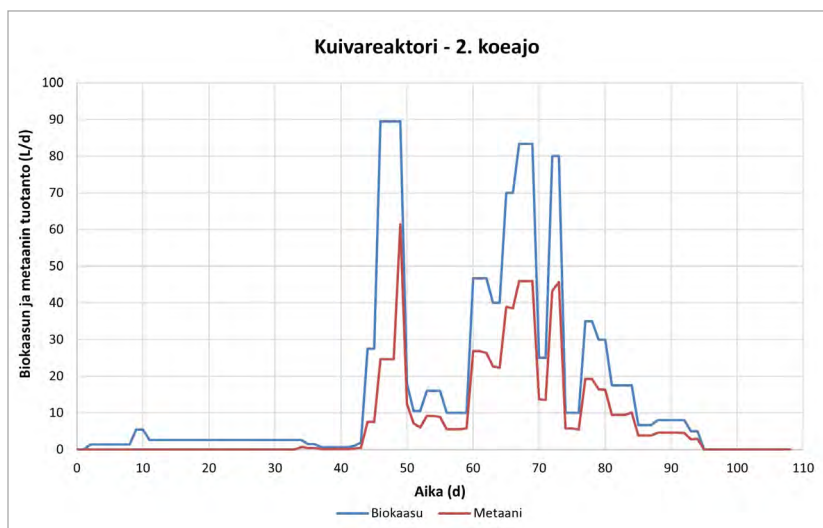
KUVA 1. Märkäreaktorin ensimmäinen koeajo.

## Toinen koeajo – märkä- ja kuivareaktorin automaation optimointia

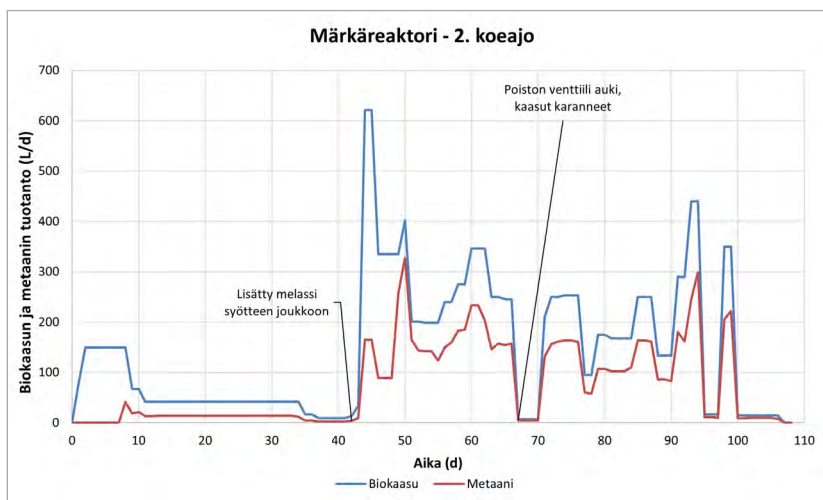
Toinen koeajo käynnistyi 23.8.2022, ja silloin käynnistettiin molemmat biokaasureaktorit. Kokeen tarkoituksena oli koeajaa kuivareaktori ja tehostaa BioLuupin käynnistys- ja ajokäytäntöjä. Ympäriä käytettiin laimennettua jätevesireaktorin mädätettä. Reaktoreiden lämmitys asetettiin 37 asteeseen. Kuivareaktorin syötteenä toimi nurmirehu ja märkäreaktorin syötteenä laimennettu jätevesireaktorin mädäte ja melassi.

Märkä- ja kuivareaktorin syöttö ja poisto tapahtuivat aluksi manuaalisesti monitorointikäyntien yhteydessä. Koeajovuorokaudesta 43 (5.10.2022) alkaen märkäreaktorissa käynnistettiin automaattisyöttö ja -poisto kolme kertaa vuorokaudessa seitsemänä päivänä viikossa. Kuivareaktorin automaattisyöttö käynnistyi 45. koeajovuorokauden kohdalla (7.10.2022).

Molemmat reaktorit purettiin (9.12.2022) 108 koeajovuorokauden jälkeen. Toisen koeajon aikana märkäreaktorin metaanipitoisuus kaasussa oli korkeimmillaan 82 prosenttia, ja keskiarvometaanipitoisuus oli 55 prosenttia. Kuivareaktorin metaanipitoisuus kaasussa oli koeajon aikana korkeimmillaan 69 prosenttia ja keskiarvometaanipitoisuus oli 52 prosenttia. Tuotetut kaasumäärät on esitetty kuvissa 2 ja 3.



KUVA 2. Bioluopin koeajo 2 – kuivareaktorin ensimmäinen koeajo, syötteenä nurmirehu-melassi-seos.



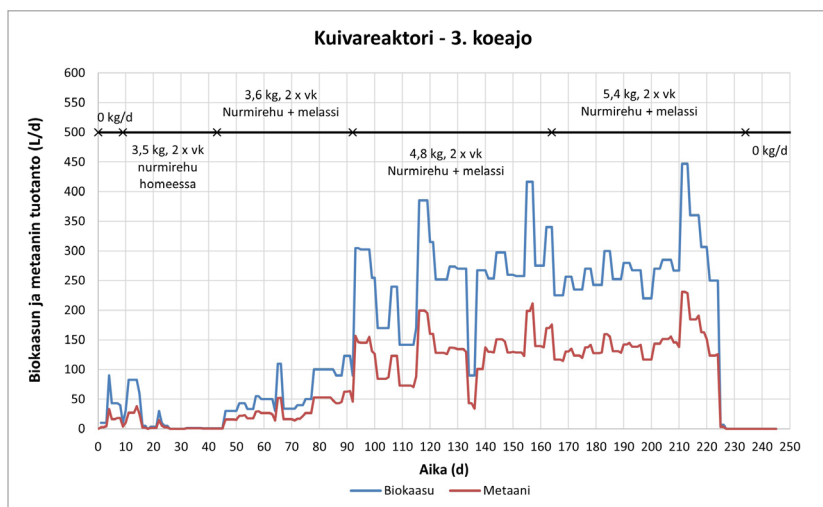
KUVA 3. Bioluopin koeajo 2 – märkäreaktorin toinen koeajo, syötteenä laimennettu jätevesimädäte-melassi-seos.

Koeajon aikana kuivareaktorin kiintoainepitoisuus TS nousi noin kuu-  
desta kahdeksaan prosenttiin ja samalla orgaanisen aineen pitoisuus  
nousi 3,7 prosentista 4,6 prosenttiin. Alkaliteetti vaihteli kuivareaktorilla  
0,51–0,65 ja märkäreaktorilla 0,59–0,71. Alkaliteettiarvoihin on vaikutta-  
nut käynnistyksessä käytetty ympäri eli tässä koeajossa jätevesimädäte,  
jonka sisältämät kemikaalit häiritsevät analytiikkaa tuottamalla todelli-  
suutta korkeampia alkaliteettiarvoja.

## Kolmas koeajo – kuivareaktori ja haitta-aineet

Kolmas koeajo suoritettiin kuivareaktorilla. Se käynnistettiin 20.2.2023 kuivamenetelmään pohjautuvan biokaasulaitoksen ympillä. Tällä kertaa reaktorin lämpötila nostettiin 39 asteeseen. Reaktori alkoi välittömästi tuottaa kaasua, ja syöttö aloitettiin ajon yhdeksännen päivän kohdalla nurmirehulla. Kuuden viikon jälkeen lisättiin nurmirehun joukkoon melassia massasuhteella 1:5 tukemaan biokaasun tuotantoa.

Reaktori purettiin 245 vuorokauden jälkeen 23.10.2023. Koeajon aikana kuivareaktori tuotti 39 m<sup>3</sup> biokaasua, josta 19,7 m<sup>3</sup> oli metaania. Metaanipitoisuus kaasussa oli koeajon aikana korkeimmillaan 60 prosenttia ja keskiarvometaanipitoisuus oli 50 prosenttia. Biokaasun ja metaanin päiväkohtaiset tuotot on esitetty kuvassa 4.



KUVA 4. Bioluupin koeajo 3 – kuivareaktorin koeajo, syötteenä nurmirehu-melassi-seos.

Taulukossa 2 on esitetty kolmannen koeajon ajovaiheet, syöttöjaksot ja kaasun tuotantotiedot. Kuormitusarvo OLR (Organic Loading Rate) vaihteli 0,5–4,2 gVS/d/l. Viipymäaika HRT (Hydraulic Retention Time) jäi reaktorissa korkeaksi ollen yli 50 vuorokautta.

**TAULUKKO 2.** Koeajo 3 – kuivareaktorin koeajovaiheet, biokaasun tuotot ja analyysitulokset.

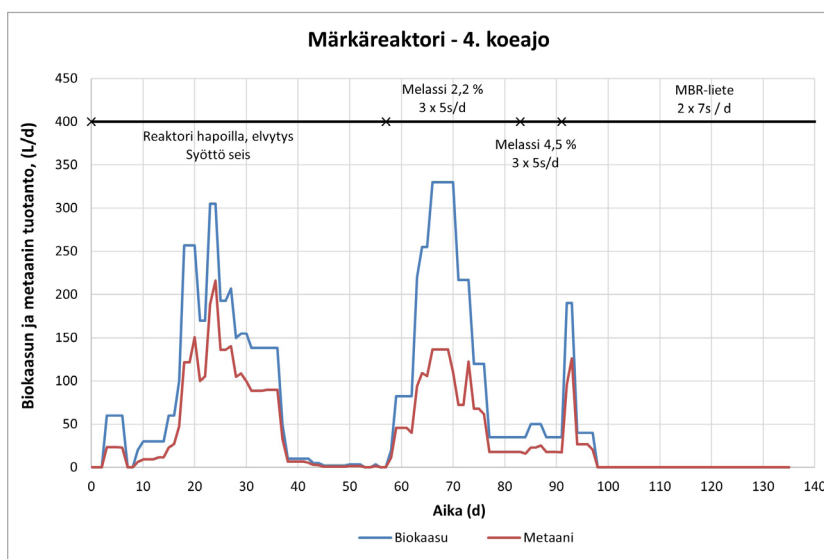
	Vaihe 1 20.2.-28.2.2023 (0-8 vrk)	Vaihe 2 1.3.-3.4.2023 (9-42 vrk)	Vaihe 3 4.4.-22.5.2023 (43-91 vrk)	Vaihe 4 23.5.-3.8.2023 (92-164 vrk)	Vaihe 5 4.8.-11.10.2023 (165-233 vrk)	Vaihe 6 12.10.-23.10.2023 (234-245 vrk)
Syöteseoksen kuiva-aine TS (%)	-	30,5	37,1	31,5	31,5	-
Syöteseoksen orgaaninen aines VS (%)	-	27,8	31,4	36,8	36,8	-
Syöttö (kg/d, 2 krt/vk)	-	3,5	3,6	4,8	5,4	-
Syöttö (gVS/d, 2 krt/vk)	-	278	1 132	1 512	1701	-
pH (keskiarvo)	8,3	8,3	8,5	8,9	9,2	9,4
Alkaliteetti (keskiarvo)	0,44	0,42	0,47	0,38	0,23	0,34
Johtokyky (mS/cm, keskiarvo)	19,2	19,3	14,5	17,8	23,5	28,0
Biokaasun tuotto (l)	290	516	2 834	18 810	16 553	0
Biokaasun tuotto (l/d, keskiarvo)	36,3	15	54	258	240	0
Biokaasun tuotto (l/d, vaihteluväli)	0-90	0-83	1-110	90-385	0-447	0
Metaanin tuotto (l)	112	204	1 447	9 336	8 614	0
Metaanin tuotto (l/d, keskiarvo)	12	6	40	128	125	0
Metaanin tuotto (l/d, vaihteluväli)	0-34	0-38	1-56	46-199	0-231	0



## Neljäs koeajo – märkäreaktori

Neljäs koeajo suoritettiin 21.2.–6.7.2023 märkäreaktorilla. Mädätteenä käytettiin märkäreaktorin ympppiä, jonka alkaliteetti oli kuormitteinen kokeiden käynnistyksen aikana (0,85). Reaktorin syöttö aloitettiin laimennetulla melassilla. Tämän jälkeen syöttöä jatkettiin laimennetulla MBR-lietteellä.

Reaktori purettiin 135 koeajovuorokauden jälkeen 6.7.2023. Märkäreaktori tuotti koeajon aikana 9,2 m<sup>3</sup> biokaasua, josta 4,8 m<sup>3</sup> oli metaania. Metaanipitoisuus oli korkeimmillaan 71 prosenttia ja keskiarvometaanipitoisuus oli 51 prosenttia. Biokaasun ja metaanin päivakohtaiset tuotot on esitetty kuvassa 5.



KUVA 5. Bioluupin koeajo 4 – märkäreaktorin kolmas koeajo, jossa syötteenä ensin laimennettu melassi ja sen jälkeen laimennettu, hygienisoimaton MBR-liete

Taulukossa 3 on esitetty neljännen koeajon ajovaiheet, syöttöjaksot ja tuotantotiedot. Kuormitusarvo OLR (Organic Loading Rate) vaihteli 0,5–1,1 gVS/d/l. Viipymäaika HRT (Hydraulic Retention Time) oli reaktorissa noin 40 vuorokautta.

**TAULUKKO 3.** Koeajo 4 – märkäreaktorin koeajovaiheet, biokaasun tuotot ja analyysitulokset.

	Vaihe 1 20.2.–28.2.2023 (0–8 vrk)	Vaihe 2 1.3.–3.4.2023 (9–42 vrk)	Vaihe 3 4.4.–22.5.2023 (43–91 vrk)	Vaihe 4 23.5.–3.8.2023 (92–164 vrk)
Syöteseoksen kuiva-aine TS (%)	2,8	3,1	6,4	5,8
Syöteseoksen orgaaninen aines VS (%)	1,9	2,2	4,5	4,4
Syöttö (kg/d, 2 krt/vk)	-	3 x 5 s	3 x 5 s	2 x 5–7 s
pH (keskiarvo)	7,4	7,8	7,6	7,7
Alkaliteetti (keskiarvo)	0,85	0,85	0,56	0,35
Johtokyky (mS/cm, keskiarvo)	14,0	18,6	8,9	10,4
Biokaasun tuotto (l)	4 365	3 950	325	575
Biokaasun tuotto (l/d, keskiarvo)	78	152	41	13
Biokaasun tuotto (l/d, vaihteluväli)	0–305	0–330	35–50	0–190
Metaanin tuotto (l)	2 593	1 726	158	339
Metaanin tuotto (l/d, keskiarvo)	45	66	20	8
Metaanin tuotto (l/d, vaihteluväli)	0–216	0–137	16–25	0–126

## Johtopäätökset

Koeajojen aikaa BioLuuppi-ympäristö todettiin toimivaksi uusien materiaalien testaamista varten. Tuloksia voivat hyödyntää alueen nykyiset biokaasulaitokset Juvan BioSon Oy ja BioSairila Oy sekä tulevat laitokset.

BioLuuppi-ympäristössä voidaan toteuttaa riskittömämmin täyden mittakaavan biokaasulaitosten materiaalivirtojen testauksia myös tulevaisuudessa.

# BIOJALOSTEIDEN UUDET TUOTEMARKKINAT JA KAUPALLINEN ARVO

Tiina Saario & Salla Pulliainen & Hanne Soininen  
& Jonne Gråsten

Nykyinen maailmantilanne on osoittanut sen, että lannoitteiden raaka-aineiden saatavuus voi nopeasti muodostua vakavaksi ongelmaksi. Vuoden 2022 alussa hinnat nousivat rajusti, eivätkä ne vielääkään ole palanneet entiselle tasolle. Biokaasulaitokset voivat toimia myös vakauttamassa ravinnemarkkinoita. BioCir-hankkeen työpaketissa neljä ”Biojalosteiden ja kierrätyslannoitteiden uudet tuotekonseptit” tehtiin selvitystä biolaitosmädätteen ja sen eri jakeiden soveltuvuudesta kierrätyslannoitteiden valmistukseen näiden sisältämien ravinneaineiden perusteella.

## Lannoiteravinteet ja niiden hintojen muutokset

Typpi ja fosfori ovat lannoitteiden yleisiä raaka-aineita, ja niitä käytetään hyvin monentyppisiin käyttötarkoituksiin suunnitelluissa lannoitteissa (taulukko 1). Lisäksi muita yleisiä ravinneaineita ovat muun muassa kalium, boori, magnesium, rikki ja rauta.

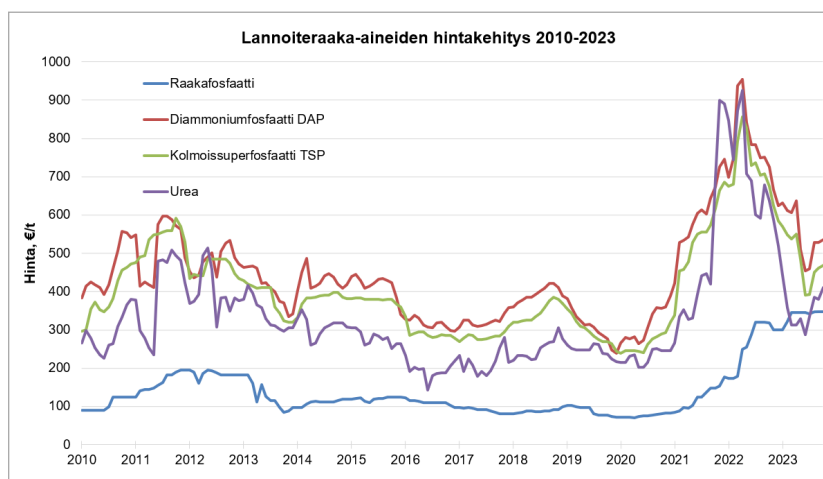
**TAULUKKO 1.** Lannoitteiden ravinnekoostumukset (Yara 2023, Hankkija 2023, Kekkilä 2020, Aglukon s.a.).

Tuote	Käyttökohde	Typpi			Fosfori	Muut ravinteet
		Kokonais-typpi	Nitraattityppi	Ammoniumtyppi		
YaraMila Metsän NP	Metsä	25 %	12 %	13 %	2 %	Magnesium 1 % Boori 0,3 % Sinkki 0,1 %
YaraMila Y1	Pellot	26 %	11,5 %	14,5 %	1,3 %	Kalium 4 % Rikki 3,3 % Boori 0,02 % Seleen 0,0015 %
YaraMila Hevi 1	Puutarhakasvit, perunat	8 %	2,6 %	5,4 %	5 %	Kalium 19 % Rikki 11,6 % Magnesium 2,5 % Mangaani 0,25 % Kupari 0,25 % Boori 0,25 %
Yara Ferticare 10-52-17	Starttilannoite ruokakasveille	10 %	0 %	10 %	22,7 %	Kalium 14,1 %
Kekkilä Professional Taimi-Superex	Ryhmäkasvit, metsäpuut, vihannekset	19 %	-	-	4 %	Kalium 20 %
Hankkijan NPK 4-5-20	Puutarhaja marjakasvit	4 %	-	-	5,2 %	Kalium 19,9 % Magnesium 3,5 % Rikki 1,6 %
Plantacote Pluss 6M	Kukat, istutukset, viherkasvit	14 %	6,3 %	7,7 %	3,9 %	Kalium 12,5 % Magnesium 1,2 % Rauta 0,4 % Mangaani 0,1 % Sinkki, boori, molybdeeni, kupari, alle 0,1 %
Kekkilän sammalsyöjä PLUS+	Sammaloitunut nurmikko	10 %	-	-	1 %	Kalium 7 % Rikki 7 % Rauta 2 %
Vilomix N-xt Ferti 5 Fertistart	Starttilannoite (piensiemen), viljojen starttipeit-taus	3 %	-	-	9,17 %	Magnesium 0,78 % Boori 0,31 % Mangaani 0,74 % Boori 0,31 % Molybdeeni 0,01 %

Vuosi 2022 nosti ravinteiden hintoja jopa kolmin-nelinkertaisiksi. Hinnat ovat lähteneet uudelleen laskuun, mutta ne eivät ole vielä palautuneet edelliselle tasolle. Maailmanpankin ennusteen (World Bank Group 2023) mukaan lannoitteiden ja niiden raaka-aineiden hinnat kuitenkin jatkavat laskua pelkästään vuoden 2024 aikana vielä 15 prosenttia sitä mukaa, kun syntynyttä alijäämää saadaan paikattua. Ennusteen mukaan esimerkiksi ammoniumnitraatin hinta on vuonna 2025 pienentynyt 365 euroon/tonni ja raakafosfaatin hinta 230 euroon/tonni (World Bank Group 2023). Taulukossa 2 on esitetty lannoiteraaka-aineiden hintojen kehitys 2020-luvun aikana ja kuvassa 1 samaisten raaka-aineiden hintojen muutokset vuosina 2010–2023.

**TAULUKKO 2.** Lannoiteraaka-aineiden hinnat 2020–2023 (The Pink Sheet 2023, World Bank Group 2023).

	2023 lokakuu (viimeisin hinta)	Raaka-aineiden vuoden keskiarvohinnat			
		2023 (tammi-lokakuu)	2022	2021	2020
Urea (rae)	375,60 e/t	324,64 e/t	639,18 e/t	400,13 e/t	209,20 e/t
Diammoniumfosfaatti DAP	488,33 e/t	501,50 e/t	705,11 e/t	548,78 e/t	285,26 e/t
Kolmoissuperfosfaatti TSP	427,43 e/t	442,37 e/t	653,88 e/t	491,44 e/t	241,98 e/t
Raakafosfaatti	317,31 e/t	308,66 e/t	243,07 e/t	112,50 e/t	69,49 e/t



**KUVA 1.** Lannoiteraaka-aineiden hintojen kehitys 2010–2023 (mukaillen World Bank 2023).

## Mädätteiden ravinnepotentiaali – uudet käyttökohteet

Mädätteen käyttökohteet, jatkojalostusmahdollisuudet ja ravinnekoostumus riippuvat pitkälti mädätyslaitoksesta, sen syötemateriaaleista ja prosessista. Esimerkiksi maatilalan oman biokaasulaitoksen mädätettä voidaan monesti käyttää sellaisenaan lannoituskäytössä tilan omilla pelloilla.

Mädätteen ravinnepitoisuuden määräävät reaktorin syötemateriaalit ja niiden ravinnepitoisuus. Yleensä mädätteet sisältävät tyyppiä 2,3–4,2 kg/tonni, fosforia 0,2–1,5 kg/tonni ja kaliumia 1,3–5,2 kg/tonni. (Biogas Info 2023)

Struviittia eli fosfaattia sisältävää kiteistä ainetta voidaan käyttää fosfaattilannoituksessa maataloudessa. Mikkelissä toteutetun CityLoops-hankkeen (Junninen & Pekurinen 2023) Xamkin laboratoriokokeiden mukaan struviittia pystytään erottamaan biojättesyötteisen reaktorin mädätteen nestejakeesta lähes 3 kg/m<sup>3</sup>. Esimerkiksi Shu ym. (2006) onnistuivat erottamaan struviittia laboratoriossa 0,01 kg/m<sup>3</sup> jäteväettä.

## Ravinteiden erotus mädätysjäännöksestä

Mädätysjäännöksen kuiva- ja nestejakeet ovat usein ravinnerikkaita, mutta ne voivat vaatia erilaisia esikäsittelymenetelmiä ja rikastuskäsittelyitä ennen kuin ne soveltuvat jatkokäyttöön. Mädätteen ja siitä eroteltujen jakeiden eri käyttömenetelmiä on esitelty taulukossa 3.

**TAULUKKO 3.** Biokaasulaitoksen mädätteen käsittelymenetelmät (Herbes ym. 2020).

Käsittelymenetelmä	Raakamädäte	Kuivajae	Märkäjae
Fysikaalinen	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ruuvipuristin (kiintoaineen erotus)</li> <li>Hihna- tai rumpukuivain</li> <li>Aurinkokuivain</li> <li>Ultraääni</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hihna- tai rumpukuivain</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tyhjiöhöyrytys</li> <li>Mikrosuodatus</li> <li>Ultrasuodatus</li> <li>Käänteisosmoosi</li> <li>Ammoniak-kistrippaus (fysikaalis-kemiallinen prosessi)</li> </ul>
Kemiallinen	<ul style="list-style-type: none"> <li>Flokkaus</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>Struviitin saostus</li> <li>Flokkaus</li> </ul>
Biologinen	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kompostointi</li> <li>Levä</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kompostointi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Levä</li> </ul>

Esimerkiksi nestejake sisältää paljon typpeä, ja väkevöintiä tarvitaan erityisesti silloin, jos nestejakea ei voida hyödyntää sellaisenaan lähialueella. Nestejakeen sisältämä liukoinen typpi voidaan rikastaa esimerkiksi kalvosuodatuksen avulla. Lisäksi puhdasta typpiravinnetta voidaan erottaa nestejakeesta strippaamalla, jolloin ammoniumtyppi erotetaan nesteestä kaasumaisessa ammoniakkimuodossa. (Horn ym. 2020)

Myös fosforia voidaan erottaa pieniä määriä kalvosuodatuksen avulla. Toinen tapa erottaa fosfori nestejakeesta on struviittikiteytys, jossa fosfori muutetaan kiteytyneeseen muotoon. Kuivajakeen sisältämä fosfori voidaan ottaa talteen termisillä menetelmillä, kuten poltolla tai pyrolyysillä. Tällöin syntyy fosforipitoista hiilijakea. Termisen menetelmän heikkoutena on tosin se, että kuivajakeen sisältämä typpi useimmiten menetetään käsittelyn aikana. (Horn ym. 2020)

Myös laitostyyppi vaikuttaa mädätysjäännöksen ja sen ravinteiden jatkokäsittelyyn. Maatilan oman biokaasulaitoksen mädätteen jatkokäsittelymenetelmät, jos sellaisia on tarve tehdä, ovat monesti separointi ja kompostointi. Separoinnilla saadaan erotettua kuivajake ja nestejake. Nestejake tulee joko mullata tai levittää pelloille heti, jotta sen sisältämä typpi ei pääse kaasuuntumaan taivaalle. Jos tämä ei ole mahdollista, jake voidaan ohjata takaisin prosessiin. Kuivajakeen kompostointi vaatii onnistuakseen muuta eloperäistä materiaalia sekä kasan kääntelyä säännöllisesti kompostoitumisen edistämiseksi. (RE-maatila s.a.)

Mädätteen jatkojalostuksen aiheuttamia kustannuksia on tutkittu paljon. Taulukossa 4 on Herbesin ym. (2020) kokoama yhteenveto eri käsittelymenetelmien aiheuttamista kustannuksista per kuutio mädätettä.

**TAULUKKO 4.** Yhteenveto mädätteiden käsittelykustannuksista (Herbes ym. 2020).

Käsittelymenetelmä	e/m <sup>3</sup>	Lisätiedot	Alkuperäinen selvitys
Separointi (dekanterri)	0,63	2000 kW:n laitos	Block (2009)
Hihnaquivain	5,81	Lämmitys: 0 e/kWh	Bolzonella ym. (2018)
	7,75	-	Döhler & Wulf (2009)
Kiintopatjakuivain (sis. happopesun)	14,00	-	Golkowska ym. (2014)
Leijupetikuivain (sis. happopesun) ja pelletöinti	14,00	-	Golkowska ym. (2014)
Tyhjiöhöyrytys	10,06	-	Döhler & Wulf (2009)
Strippaus	5,44	Lämmitys: 0 e/kWh Sähkö: 0,10 e/kwh	Bolzonella ym. (2018)
	4,50–8,60	Vain käyttökulut	Vaneckhaute ym. (2016)
	8,49	-	Döhler & Wulf (2009)
Dekantointi ja ultra-suodatus	3,63	2000 kW:n laitos	Block (2009)
Dekantointi, ultra-suodatus ja käänteis-osmoosi	5,64	2000 kW:n laitos	Block (2009)
Kalvosuodatus	6,97	Sähkö: 0,10 e/kwh	Bolzonella ym. (2018)
	4,22	-	Vaneckhaute ym. (2016)
	7,96	-	Döhler & Wulf (2009)
Sentrifugointi, käänteis-osmoosi, höyrystin, leijupetikuivaus (sis. ilmanpesin)	15,90	-	Golkowska ym. (2014)
Rumpuseula, ruuvipuristin, käänteis-osmoosi, höyrystin, vesihaude happopesulla	37,80	-	Golkowska ym. (2014)



## Mädätteiden sisältämien ravinteiden taloudellinen arvo

BioCir-hankkeessa tehtiin neljälle täyden mittakaavan biokaasureaktorin ja BioLuuppi-demonstraatioympäristön biokaasureaktoriin mädätteille ravinneanalyysit ALS Finland Oy:llä. Tulokset on esitetty taulukoissa 5 ja 6.

**TAULUKKO 5.** Biokaasulaitosten ravinnetulokset (ALS Finland Oy).

Para- metri	Yksikkö	Märkä- mädät- tämö	Kuivamädättämö		
			Reaktori 1 – Jätevesi- mädäte	Reaktori 2 – Biojätemä- däte	Reaktori 3 – Biojätemä- däte
Kokonais- typpi	g/kg k.a.	69,3	68,6	77,6	80,2
	kg/t (märkä)	3,8	8,7	9,2	9,9
C/N- suhde	-	5,76	4,64	4,22	4,33
Fosfori P	% k.a.	0,915	3,82	1,32	1,74
	kg/t (märkä)	0,5	4,9	1,6	2,1

Märkämädättämön mädäte sisältää analyysien mukaan typpeä 3,8 kg/tonni. Analyysitulosten mukaan määrä sisälsi noin 80 prosenttia liukoista typpeä, mikä tarkoittaa noin 3 kg/t. Jos käytetään typen markkinahintana 1 560 euroa tonnia kohden, olisi märkämädätteen tonnihinta kasville sopivan liukoisen typen osalta 4,80 euroa. Jos käytetään fosforin markkinahintana 10 000 euroa tonnia kohden, olisi märkämädätteen sisältämän fosforin tonnihinta 5,10 euroa. Mädätetonnin sisältämän typen ja fosforin taloudellinen arvo olisi vajaa kymmenen euroa mädätetonna kohden. Levitettäessä märkämädätettä pellolle 1 000 tonnia olisi sen sisältämä typen ja fosforin taloudellinen arvo tämän laskelman mukaan 10 000 euroa.

Kuivamädättämön jätevesimädäte sisältää analyysien mukaan typpeä 8,7 kg/t. Analyysitulosten mukaan määrä sisälsi noin 80 prosenttia liukoista typpeä, mikä tarkoittaa noin 7 kg/t. Jos käytetään typen markkinahintana 1 560 euroa tonnia kohden, olisi kuivamädätteen tonnihinta kasville sopivan liukoisen typen osalta 11 euroa. Jos käytetään fosforin markkinahintana 10 000 euroa tonnia kohden, olisi mädätteen sisältämän fosforin tonnihinta 48,50 euroa. Mädätetonnin sisältämän typen ja fosforin taloudellinen arvo olisi noin 60 euroa mädätetonna kohden.

Kuivamädättämön biojätämädäte sisältää analyysien mukaan typpeä 9,2–9,9 kg/t. Analyysitulosten mukaan määrä sisälsi noin 80 prosenttia liukoista typpeä, mikä tarkoittaa noin 7,64 kg/t. Jos käytetään typen markkinahintana 1 560 euroa tonnia kohden, olisi mädätteen tonnihinta kasville sopivan liukoisen typen osalta 12 euroa. Jos käytetään fosforin markkinahintana 10 000 euroa tonnia kohden, olisi mädätteen sisältämän fosforin tonnihinta 19 euroa. Mädätetonnin sisältämän typen ja fosforin taloudellinen arvo olisi 31 euroa mädätetonna kohden.

Taulukossa 6 on esitetty BioLuuppi-demonstraatioympäristössä tehtyjen koesarjojen analyysituloksia. Kokeiden aikana testattiin muun muassa MBR-lietteen käyttämistä märkäreaktorin syötteenä ja kuivareaktorissa käytettiin syötteenä muun muassa nurmirehua.

**TAULUKKO 6.** BioLuuppi-ravinnetulokset (ALS Finland Oy).

Parametri	Yksikkö	Märkäreaktori		Kuivareaktori	
		23.5.2023, koe 3 kk käynnissä	5.7.2023, purku	13.6.2023, koe 4 kk käynnissä	16.10.2023, purku
Kokonaisytyppi	g/kg k.a.	96,5	160	45,2	102
	kg/t (märkä)	1,1	1,2	5,7	6,7
C/N-suhde	-	3,46	1,66	8,52	3,64
Fosfori P	% k.a.	0,617	1,26	0,668	0,363
	kg/t (märkä)	0,07	0,10	0,84	0,24

BioLuupin koeajojen märkäreaktorin mädäte sisälsi kokeiden päättymisen jälkeen typpeä 1,2 kg/tonni. Analyysitulosten mukaan määrä sisälsi noin 80 prosenttia liukoista typpeä, mikä tarkoittaa noin 1 kg/t. Jos käytetään typen markkinahintana 1 560 euroa tonnia kohden, olisi märkämädätteen tonnihinta kasville sopivan liukoisen typen osalta 1,60 euroa. Jos käytetään fosforin markkinahintana 10 000 euroa tonnia kohden, olisi märkämädätteen sisältämän fosforin tonnihinta 1,00 euroa. Mädätetonnin sisältämän typen ja fosforin taloudellinen arvo olisi noin 2,60 euroa mädätetonna kohden.

BioLuupin koeajojen kuivamädäte sisälsi kokeiden päättymisen jälkeen typpeä 6,7 kg/tonni. Analyysitulosten mukaan määrä sisälsi noin 80 prosenttia liukoista typpeä, mikä tarkoittaa noin 5,4 kg/t. Jos käytetään typen markkinahintana 1 560 euroa tonnia kohden, olisi mädätteen tonnihinta kasville sopivan liukoisen typen osalta 8,40 euroa. Jos käytetään

fosforin markkinahintana 10 000 euroa tonnia kohden, olisi mädätteen sisältämän fosforin tonnihinta 2,40 euroa. Mädätetonnin sisältämän typen ja fosforin taloudellinen arvo olisi vajaa 11 euroa mädätetonnin kohden.

## Mädätteiden jatkojalostuksen ympäristövaikutukset

Mädätteen sisältämien ravinteiden taloudellisuustarkastelujen lisäksi voisi selvittää myös mädätteistä valmistettujen lopputuotteiden kaupallistamismahdollisuuksia. Tällaisia tuotteita voisivat olla esimerkiksi Bio-Cir-hankkeessa testattu jätevesimädäte–turve-seos, joka on jalostettu lannoitteeksi kuivaamalla ja rakeistamalla. Tällöin laskelmissa tulisi tarkastella muun muassa mädätteen kuivaustekniikkaa ja sen kustannuksia, turpeen hankintahintaa sekä rakeistuksen tekniikkaa ja kustannuksia. Jätevesipohjaisten kierrätyslannoitteiden käyttöön liittyy sekä peltolannoittamiseen liittyviä rajoituksia että epäilyjä niiden lannoitekäytön turvallisuudesta.

Hornin ym. (2020) tekemän selvityksen mukaan biokaasulaitoksen mädätteestä valmistetut kierrätyslannoitteet ovat mineraalilannoitetta vähäpäästöisempi vaihtoehto. Nämä päästöt muodostuvat lannoitevalmisteesta riippuen eri tuotanto- ja käyttöketjuissa. Kierrätyslannoitevalmisteiden etuna tässä tapauksessa on, että ne sisältävät valmiiksi monesti eri ravinteita. (Horn ym. 2020)

Biokaasulaitosten mädätteet sopivat käytettäväksi lannoitteena, ja ne olisivat kustannustehokas ja ympäristöystävällinen vaihtoehto neitseellisille lannoiteraaka-aineille. Lisääntyvä tutkimustieto erilaatuisten lietteiden ja mädätteiden laadusta sekä tiedon pohjalta tarkentuva lainsäädäntö edesauttavat kierrätyslannoitteiden kehitystä ja niiden käyttöä.

# LÄHTEET

*Aglukon s.a.* Plantacote pluss 6 M -tuoteseloste. PDF-dokumentti. Saatavilla: <https://horticentre.co.nz/wp-content/uploads/Technical%20Sheets/Plantacote-Pluss-6M-HC-TS.pdf> [viitattu 28.11.2023]

*Biogas Info 2023.* The Official Information Portal on Anaerobic Digestion – Digestate. Päivitetty 2023. Saatavilla: <https://www.biogas-info.co.uk/about/digestate/> [Viitattu 29.11.2023].

*Block, R.* 2009. Ökonomische und ökologische Bewertung von Gärrestaufbereitungssystemen - auf der Basis von Praxisversuchen. Teoksessa Gärrestaufbereitung für eine pflanzenbauliche Nutzung – Stand und F+E-Bedarf. 29–52. PDF-dokumentti. [https://www.fnr.de/fileadmin/Projekte/2021/Mediathek/gfg\\_band\\_30\\_gaerrestaufbereitung.pdf#page=30](https://www.fnr.de/fileadmin/Projekte/2021/Mediathek/gfg_band_30_gaerrestaufbereitung.pdf#page=30). Saatavissa: [Viitattu 28.11.2023]

*Bolzonella, D., Fatone, F., Gottardo, M. & Frison, N.* 2018. Nutrients recovery from anaerobic digestate of agro-waste: Techno-economic assessment of full scale applications. *Journal of Environmental Management* 216. 111-119. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.08.026> [Viitattu 28.11.2023].

*Döhler, H. & Wulf, S.* 2009. Aktueller Stand bei der Gärrestaufbereitung. Teoksessa Gärrestaufbereitung für eine pflanzenbauliche Nutzung – Stand und F+E-Bedarf. 15–28. PDF-dokumentti. Saatavissa: [https://www.fnr.de/fileadmin/Projekte/2021/Mediathek/gfg\\_band\\_30\\_gaerrestaufbereitung.pdf#page=30](https://www.fnr.de/fileadmin/Projekte/2021/Mediathek/gfg_band_30_gaerrestaufbereitung.pdf#page=30). [Viitattu 28.11.2023]

*Golkowska, K., Vázquez-Rowe, I., Lebuf, V., Accoe, F. & Koster, D.* 2014. Assessing the treatment costs and the fertilizing value of the output products in digestate treatment systems. *Water Science & Technology* 3. 656–662. PDF-tiedosto. Saatavilla: <https://doi.org/10.2166/wst.2013.742> [viitattu 28.11.2023]

*Hankkija 2023.* Päivitetty 2023. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.hankkija.fi/> [viitattu 28.11.2023]

*Herbes, C., Roth, U., Wulf, S. & Dahlin, J.* 2020. Economic assessment of different biogas digestate processing technologies: A scenario-based analysis. *Journal of Cleaner Production* 25. 120282. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120282> [Viitattu 28.11.2023].

*Horn, S., Seppänen, A.-M., Winquist, E., Lehtoranta, S. & Luostarinen, S.* 2020. Biokaasulaitoksen mädätysjäännöksen hyödyntämismahdollisuudet – Vaihtoehtojen ilmastovaikutukset ja taloudellisuus. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 42. PDF-dokumentti. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-11-5229-0>. [Viitattu 28.11.2023].

*Junninen, J. & Pekurinen, L.* 2023. Fosforin talteenotto mädätteen nestejakeesta elektrokemiallisella menetelmällä. Teoksessa Soinen, H. & Malk, V. (toim.) Cityloops – kiertotaloutta edistämässä kansainvälisesti. Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu Xamk kehittää 221. 111–139. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-344-541-3>. [Viitattu 28.11.2023].

*Kekkilä* 2020. Nurmikon sammalsyöjä PLUS+. Päivitetty 2020. WWW-dokumentti. Saatavissa <https://www.kekkila.fi/tuotteet/nurmikon-sammalsyoja-plus/> [Viitattu 28.11.2023].

*RE-maatila s.a.* Biokaasulaitoksen mädätysjäännös. WWW-dokumentti. Saatavissa <http://ravinnejaenergia.fi/materiaali/omalannoitteet/biokaasulaitoksen-madatyksjaannos-ja-komposti/> [Viitattu 28.11.2023].

*Shu, L., Schneider, P., Jegatheesan, V. & Johnson, J.* 2006. An economic evaluation of phosphorus recovery as struvite from digester supernatant. *Bioresource Technology* 17. 2211–2216. PDF-dokumentti. Saatavilla <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.11.005> [Viitattu 28.11.2023].

*The Pink Sheet.* 2023. The World Bank - World Bank Commodities Price Data (The Pink Sheet). Päivitetty 2.11.2023. PDF-dokumentti. Saatavilla: <https://thedocs.worldbank.org/en/doc/5d903e848db1d1b83e0ec8f744e55570-0350012021/related/CMO-Pink-Sheet-November-2023.pdf> [Viitattu 28.11.2023]

*The World Bank.* 2023. Commodity Markets – Monthly Prices. Päivitetty marraskuussa 2023. WWW-dokumentti. Saatavilla: <https://www.worldbank.org/en/research/commodity-markets> [Viitattu 28.11.2023]

Vaneekhaute, C., Lebuf, V., Michels, E., Belia, E., Vanrolleghem, P. A., Tack, F. M. G. & Meers, E. 2016. Nutrient Recovery from Digestate: Systematic Technology Review and Product Classification. *Waste and Biomass Valorization* 8. 21–40. WWW-dokumentti. Saatavilla <https://link.springer.com/article/10.1007/s12649-016-9642-x> [Viitattu 28.11.2023]

World Bank Group. 2023. Commodity Markets Outlook – Under the Shadow of Geopolitical Risks. A World Bank Report October 2023. PDF-dokumentti. Saatavilla <https://openknowledge.worldbank.org/server/api/core/bitstreams/27189ca2-d947-4ca2-8e3f-a36b3b5bf4ba/content>. [Viitattu 28.11.2023]

Yara 2023. Lannoitteet. Päivitetty 2023. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.yara.fi/lannoitus/lannoitteet/> [viitattu 28.11.2023]

# BIOKAASUN KESTÄVYYSKRITEERIT

Salla Pulliainen & Minttu Paakkari

BioCir – Kiertotalouden sivuainevirrat uusiksi tuotteiksi -hankkeessa kehitettiin Etelä-Savon alueen orgaanisten materiaalivirtojen hyödyntämistä biokaasuna ja kierrätyslannoitteina. Suomessa biomassapolttoaineiden kestävyys on pitänyt osoittaa jo vuodesta 2021 alkaen. Biomassapolttoaineiden tuotannossa käytetyille raaka-aineille tulee tehdä RED II -direktiivin mukainen kestävyystarkastelu, mikäli biokaasua käytetään polttoaineena tai lämmityksessä. Tämä katsaus käsittelee RED II -direktiivin sisältöä, biokaasun raaka-aineiden kestävyyskriteerejä sekä vuonna 2022 ja 2023 voimaan astuneita biokaasun käyttöön liittyviä verotusmuutoksia.

## RED II-direktiivi

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivissä (EU) 2018/2001 uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian käytön edistämiseksi asetetaan sitova tavoite uusiutuvan energian kokonaisuuden kasvattamiselle EU:ssa vuonna 2030. Lisäksi direktiivi sisältää sääntöjä muun muassa uusiutuvista lähteistä tuotettavaan sähkөөn sekä uusiutuvan energian lämmitys-, jäähdytys- ja liikennekäyttöön liittyen. Direktiivillä vahvistetaan myös biopolttoaineita, bionesteitä ja biomassapolttoaineita koskevat kestävyyskriteerit sekä kasvihuonepäästöjen vähennyksiä koskevat kriteerit. Suomessa direktiivin toteutumista kansallisella tasolla ohjaa laki biopolttoaineista, bionesteistä ja biomassapolttoaineista (2013/393, jäljempänä ”kestävyyslaki”).

## Biokaasun kestävyyskriteerit

Biokaasu on kestävä, mikäli se täyttää kestävyyslain (2013/393) mukaiset kestävyyskriteerit. Vaatimus biomassapolttoaineiden kestävyyskriteerit on ollut voimassa jo 1.1.2021 alkaen. Suomessa kestävyyslain noudattamista ja muita kyseisen lain mukaisia viranomaistehä-

viä valvoo Energiavirasto. Jotta biokaasu voidaan luokitella kestäväksi, biokaasun tuottajalla tulee olla Energiaviraston hyväksymä kestävyysjärjestelmä. (Verohallinto 2023a.)

Kestävyyslain (2013/393) toisessa luvussa biopolttoaineiden, bionesteiden ja biomassapolttoaineiden tuotannon raaka-aineet on luokiteltu jätteiksi ja tähteiksi sekä maa- tai metsätalouden raaka-aineiksi. Raaka-aineen luokittelu vaikuttaa siihen sovellettaviin kestävyyskriteereihin. Kaikkien biopolttoaineiden, bionesteiden ja biomassapolttoaineiden on täytettävä kestävyyslain 6 §:ssä säädetty kasvihuonekaasupäästövähennyskriteeri.

Maataloudesta, vesiviljelystä, kalastuksesta ja metsätaloudesta suoraan peräisin olevista jätteistä ja tähteistä tuotettuihin biopolttoaineisiin, bionesteisiin ja biomassapolttoaineisiin sovelletaan päästövähennyskriteerien lisäksi raaka-aineen alkuperää koskevia kestävyyskriteerejä. Muista kuin edellä luetelluista raaka-aineista tuotettujen biopolttoaineiden, bionesteiden ja biomassapolttoaineiden tulee täyttää ainoastaan päästövähennyskriteeri. Näin ollen esimerkiksi biojätteestä tai yhdyskuntajätevesilietteestä tuotetun biopolttoaineen tulee täyttää vain päästövähennyskriteerit, eikä niitä koske raaka-aineiden alkuperää koskevat kestävyyskriteerit (taulukko 1).

**TAULUKKO 1.** Raaka-aineisiin sovellettavat kestävyyskriteerit.

Raaka-aineen alkuperä	Päästövähennyskriteeri	Alkuperää koskevat kestävyyskriteerit
Maatalouden jätteet ja tähteet	x	x
Vesiviljelyn jätteet ja tähteet	x	x
Kalastuksen jätteet ja tähteet	x	x
Metsätalouden jätteet ja tähteet	x	x
Muut (mm. biojäte ja yhdyskuntajätevesiliete)	x	-



## Kasvihuonekaasupäästövähennystä koskeva kestävyyskriteeri

Kasvihuonepäästövähennykselle on asetettu kriteereitä laitoksen toiminnan aloittamisajankohdan mukaan taulukon 2 mukaisesti: mitä myöhemmin laitos on aloittanut toimintansa, sitä suurempi on vaadittu päästövähennys. Kriteerin mukaan biopolttoaineen, kuten biokaasun, elinkaaren aikaisten kasvihuonepäästöjen on oltava vähintään 50 prosenttia pienemmät verrattuna korvaavaan fossiilisen polttoaineen kasvihuonekaasupäästöihin, jos laitos oli toiminnassa 5.10.2015 tai sitä ennen. Mikäli toiminta on aloitettu 6.10.–31.12.2020, on päästövähennyksen oltava vähintään 60 prosenttia, ja 1.1.2021 tai sen jälkeen aloittaneessa laitoksessa 65 prosenttia pienemmät verrattuna korvaavaan fossiilisen polttoaineen elinkaaren aikaisiin kasvihuonekaasupäästöihin.

**TAULUKKO 2.** Päästövähennyskriteerit kestävyyslain (2013/393) mukaisesti.

	Laitoksen toiminnan aloituspäivämäärä	Päästövähennys verrattuna korvaavan fossiilisen polttoaineen kasvihuonekaasupäästöihin (%)
Biopolttoaine, liikennealalla kulutettu bio-kaasu ja bioneste:	5.10.2015 tai sitä ennen	50
	6.10.2016–31.12.2020	60
	1.1.2021 tai sen jälkeen	65
Biomassapolttolaitteista tuotettu sähkö-, lämmitys- ja jäähdytysenergia:	1.1.2021–31.12.2025	70
	1.1.2026 tai sen jälkeen	80

Lisäksi biomassapolttolaitteista tuotetulle sähkölle sekä lämmitys- ja jäähdytysenergialle on asetettu omat päästövähennyskriteerinsä. Elinkaaren aikaisen päästövähennyksen on oltava 70 prosenttia pienempi verrattuna korvaavan fossiilisen polttoaineen kasvihuonepäästöihin, mikäli laitos on aloittanut tai aloittaa toimintansa 1.1.2021–31.12.2025. 1.1.2026 lähtien toimintansa aloittavien laitosten vastaava päästövähennyskriteeri on 80 prosenttia. Huomioitavaa on, että lain mukaan jätteiden ja tähteiden ei katsota aiheuttavan elinkaaren aikaisia kasvihuonepäästöjä ennen niiden keräämistä.

## Raaka-aineiden alkuperää koskevat kestävyyskriteerit

Maatalousbiomassasta tuotettujen biopolttoaineiden, bionesteiden ja biomassapolttoaineiden tulee täyttää raaka-aineen alkuperää koskevat kestävyyskriteerit. Kriteerit liittyvät alueiden käyttöön, joilta raaka-aineet ovat peräisin. Alueiden käytössä tarkastellaan biologista monimuotoisuutta, maankäytön muutoksia ja turvemaiden kuivattamista. Kestävyyslain (2013/393) mukaiset maatalousbiomassalle asetetut kriteerit on koottu taulukkoon 3.

**TAULUKKO 3.** Kestävyyslain (2013/393) mukaiset biopolttoaineen, bionesteen tai biomassapolttoaineen raaka-aineena käytettävän maatalousbiomassan kriteerit.

<b>Biopolttoaineen, bionesteen tai biomassapolttoaineen raaka-aineena käytettävä maatalousbiomassa ei saa olla peräisin:</b>	
Alueelta, joka tammi-kuussa 2008 tai sen jälkeen oli:	Aarniometsä tai muu puustoinen maa, jossa ei näy selviä merkkejä ihmisen toiminnasta ja jossa ekologiset prosessit eivät ole merkittävästi häiriintyneet.
	Biologisesti erittäin monimuotoinen metsä tai muu puustoinen maa, joka on lajirikasta ja huonontumatonta tai jonka toimivaltainen viranomainen on yksilöinyt erityisen monimuotoiseksi, ellei esitetä näyttöä siitä, että raaka-aineen tuotanto ei häiritse luonnonsuojelutarkoitusta.
	Luonnonsuojelualue, jolle esitetä näyttöä siitä, että raaka-aineen tuotanto ei häiritse alueen suojelutarkoitusta.
	Yli hehtaarin suuruinen biologisesti erityisen monimuotoinen ruohoalue.
Alueelta, jonka maankäyttömuoto on muuttanut pysyvästi vuoden 2008 tammikuun jälkeen, jos alue oli:	Kosteikko.
	Pysyvästi metsän peittämä alue.
	Metsä, jolla latvuspeittävyys on 10–30 prosenttia, jolle esitetä näyttöä siitä, että 6§:ssä säädetty kasvihuonekaasupäästövähennys toteutuu maankäyttömuodon muutoksesta aiheutuvasta hiilivarannon muutoksesta huolimatta.
Aiemmin kuivattamaton turvemaa, jonka kuivatus on tapahtunut vuoden 2008 tammikuussa tai sen jälkeen.	-

Metsäbiomassan käyttöä raaka-aineena koskee kestävyyslain (2013/393) 10 §:ssä säädetyt kriteerit. Kriteerit liittyvät hakkuiden laillisuuteen ja hakatun metsän uudistamiseen, luonnonsuojelualueiden suojeluun, maaperän laadun ja monimuotoisuuden säilyttämiseen sekä metsän pitkän aikavälin tuotantokapasiteetin ylläpitoon ja parantamiseen. Metsäbiomassa tulee olla peräisin valtiosta, jossa edellä mainittujen toimien seuranta ja toteutus on säädetty kansallisessa lainsäädännössä. Mikäli näiden kriteerien täyttymisestä ei ole näyttöä, voidaan metsäbiomassan kestävyys osoittaa myös alueen tasolla. Lisäksi metsäbiomassasta tuotettuihin biopolttoaineisiin, bionesteisiin ja biomassapolttoaineisiin sovelletaan 10 a §:ssä säädettyjä, maankäyttöä, maankäytön muutosta ja metsätaloutta koskevia kriteerejä.

## Toiminnanharjoittajan kestävyysjärjestelmä

Toiminnanharjoittajalla tulee olla käytössään kestävyyskriteerien noudattamista koskeva järjestelmä, jonka perusteella kriteerien täytyminen voidaan todentaa laissa määritellyin menetelmin. Toiminnanharjoittajan tulee osoittaa tuottamiensa, valmistamiensa, hankkimansa, maahantuomansa, kulutukseen luovuttamien tai käyttämien biopolttoaineiden, bionesteiden ja biomassapolttoaineiden kestävyys kestävyysjärjestelmän hyväksynnän kautta. Toiminnanharjoittajan kestävyysjärjestelmän hyväksyy Energiavirasto, joka myös ylläpitää verkkosivuillaan listaa hyväksytyistä kestävyysjärjestelmistä. Energiaviraston hyväksynnän jälkeen toiminnanharjoittaja voi antaa hyväksynnän mukaisista raaka-aine-eristään kestävyystodistuksen. Kestävyyden voi osoittaa myös muulla, Euroopan komission hyväksymällä vapaaehtoisella järjestelmällä. Toiminnanharjoittajan kestävyysjärjestelmälle annettu hyväksyty päätös on voimassa viisi vuotta. (Energiavirasto)

Kestävyysjärjestelmän hyväksyntää hakiessa toiminnanharjoittajan on esitettävä hakemuksessaan kestävyysjärjestelmän kattamat biopolttoaineet, bionesteet ja biomassapolttoaineet ja niiden raaka-aineet, kriteerien täyttymisen arviointiin liittyvät, toiminnan kannalta merkitykselliset seikat, ainetasetta koskevat tiedot sekä selvitys käytettyjen menettelyjen ja ainetaseen tarkkuudesta, luotettavuudesta ja väärinkäytöksiltä suojaamiselta. Kestävyysjärjestelmän hyväksynnän jälkeen toiminnanharjoittajan tulee lisäksi antaa vuosittain Energiavirastolle selvitys kestävyysjärjestelmänsä mukaisista kestävyyskriteerien täyttymiseen liittyvistä seikoista. (Energiavirasto)

## Kestävyystodistus

Hyväksytyyn kestävyysjärjestelmän omaava toiminnanharjoittaja voi osoituksena kestävyyskriteerien täyttymisestä myöntää liikenteen biokaasulle, biopolttoaineelle, bionesteelle, biomassapolttoaineelle ja raaka-aineelle kestävyystodistuksen eräkohtaisesti. Energiaviraston mukaan kestävyystodistuksesta tulee käydä ilmi vähintään muun muassa todistuksen myöntäjän ja vastaanottajan yhteystiedot, myöntämispäivämäärä, erän yksilöinti- ja tunnistetiedot, polttoaineen ja sen raaka-aineen tiedot sekä tiedot toiminnanharjoittajan kestävyysjärjestelmästä. Lisäksi todistuksessa tulee olla tiedot raaka-aineen alkuperän 7–10 a §:ssä säädettyjen kestävyyskriteerien täyttymisestä tai tiedot maatalousmaan jätteitä ja tähteitä 5 a §:ssä 2 momentissa säädetyn kestävyyskriteerin täyttymisestä. Soveltuvien osin tiedot tulee olla myös mahdollisista polttoaineen tai raaka-aine-erän kasvihuonekaasupäästölaskelmista.

## Biokaasun tuottajien rekisteröitymisvelvollisuus

Vuodesta 2022 alkaen astui voimaan kaikkien, sekä toiminnassa olevien että toimintansa aloittavien, biokaasun tuottajien rekisteröintivelvoite. Rekisteröintivelvoite koskee niin kaupalliseen tarkoitukseen kuin omaan käyttöönkin biokaasua tuottavia laitoksia. Laitoksen tuottamaan biokaasuun sovellettava verotus riippuu muun muassa kaasun kestävyyskriteerien täyttymisestä sekä siirtoon ja käyttöön liittyvistä tekijöistä. (Suomen Biokierto ja Biokaasu ry 2023)

Biokaasun tuottajan, jolla tuotantomäärä on enintään 1 GWh/vuosi, täytyy rekisteröityä biokaasun pientuottajaksi. Pientuottajien tuottama biokaasu on verotonta paikallisesti käytettynä. Tähän lukeutuu myös biokaasu, joka ei täytä kestävyyskriteereitä. Biokaasun oman käytön lisäksi verotonta on myös biokaasun siirto verottomaan jakeluverkkoon sekä siirto valtuutetulle varastonpitäjälle tai kaasun rekisteröidylle käyttäjälle. Tuotettu biokaasu on verollista vain, mikäli kaasua syötetään verolliseen jakeluverkkoon. Myös pientuottajalle asetettiin rekisteröitymisvelvollisuus vuonna 2022. (Suomen Biokierto ja Biokaasu ry 2023)

Biokaasua yli 1 GWh/vuosi tuottavien laitosten tulee rekisteröityä biokaasun tuottajiksi. Näiden laitosten tulee antaa Verohallinnolle kuukausittain veroilmoitus, jossa käyvät ilmi verolliset ja verottomat biokaasun määrät ja siirrot muine vaadittavine tietoineen. (Suomen Biokierto ja

Biokaasu ry 2023) Biokaasun tuottajille asetetun rekisteröitymisvelvollisuuden lisäksi rekisteröitymisvelvollisuus asetettiin verottoman lämmitysbiokaasun käyttäjille sekä ilmoitusvelvollisuus sen jakelijoille.

## Biokaasun liikenne- ja lämmityskäytön valmisteverot

Biokaasun valmisteverottomuus poistui vuodesta 2022 alkaen. Tuolloin asetettiin valmistevero biokaasun liikennekäytölle, ja vuoden 2023 alusta astui voimaan myös biokaasun lämmityskäytön valmistevero. Lisäksi vuoden 2023 alusta kestävästi tuotetun biokaasun liikennekäytöstä työkoneissa säädettiin alempi verotaso. (Verohallinto 2023a) Vuoden 2023 alusta biokaasun tuotantoa on koskenut myös energiaveromallin mukainen hiilidioksidivero sekä huoltovarmuusmaksu (Suomen Biokierto ja Biokaasu ry 2023).

Biokaasutyypit jaetaan kolmeen eri veroluokkaan kestävyytensä ja käyttötarkoituksensa mukaisesti (taulukko 4). H-tyyppin biokaasua käytetään lämmityksessä, työkoneissa tai kiinteästi asennetuissa moottoreissa. T-luokkaan kuuluu jätteistä, tähteistä, lignoselluloosasta ja syötäväksi kelpaamattomasta selluloosasta valmistetut biopolttoaineet. Kestävyyskriteerit täyttävät biopolttoaineet kuuluvat luokkaan R. (Verohallinto 2023a) Verotuksessa biokaasu voi kuulua yhtä aikaa luokkiin H ja R tai H ja T. Verotuksen määrä riippuu biokaasun luokittelusta, ja ajantasaiset verotaulukot löytyvät Verohallinnon sivuilta. (Verohallinto 2023b)

**TAULUKKO 4.** Kestävyden ja käyttötarkoituksen mukaiset biokaasutyypit (Verohallinto 2023a).

Biokaasutyyppi	Määritelmä
H	Biokaasu, jota käytetään lämmityksessä, työkoneissa tai kiinteästi asennetuissa moottoreissa
T	Jätteistä, tähteistä, lignoselluloosasta ja syötäväksi kelpaamattomasta selluloosasta valmistetut biopolttoaineet
R	Kestävyyskriteerit täyttävät biopolttoaineet

## RED III -direktiivi voimaan marraskuussa 2023

Marraskuussa 2023 astuu voimaan RED III -direktiivi (Työ- ja elinkeinoministeriö 2023b). Uusi direktiivi korottaa koko EU:ta koskevaa uusiutuvan energian yleistavoitetta 32 prosentista 42,5 prosenttiin vuodelle 2030, ja sen pääasiallisena tavoitteena on kasvihuonepäästöjen vähentäminen 55 prosentilla samalla aikavälillä. Direktiivi sisältää sääntelyä muun muassa bioenergiasta ja tiukemmista vaatimuksista metsäbiomassan käytöstä energiakäytössä. Lisäksi direktiivissä on sääntelyä uusiutuvan energian tuotantolaitosten lupamenettelyistä. Tavoitteena on nopeuttaa kyseisten tuotantolaitosten rakentamista muun muassa kartoittamalla kansallinen tuotantopotentiaali ja tuotantoon sopivat alueet. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2023b)

# LÄHTEET

*Energiavirasto s.a.* Biomassojen ja biopolttoaineiden kestävyys. WWW-dokumentti. Saatavissa: [https://energiavirasto.fi/biomassojen-ja-biopolttoaineiden-kestavyys#hyvaksytyt\\_todentajat](https://energiavirasto.fi/biomassojen-ja-biopolttoaineiden-kestavyys#hyvaksytyt_todentajat)

*Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi (EU) 2018/2001.*

*Laki biopolttoaineista, bionesteistä ja biomassapolttoaineista 7.6.2013/393.*

*Motiva.* 2022. Uusiutuvan energian RED II -direktiivi. WWW-dokumentti. Päivitetty 11.8.2022. Saatavissa: [https://www.motiva.fi/ratkaisut/ohjauskeinot/direktiivit/uusiutuvan\\_energian\\_red\\_ii\\_-direktiivi](https://www.motiva.fi/ratkaisut/ohjauskeinot/direktiivit/uusiutuvan_energian_red_ii_-direktiivi)

*Suomen Biokierto ja Biokaasu ry.* 2023. Biokaasun verotukseen muutoksia 11.2023. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://biokierto.fi/biokaasun-verotukseen-muutoksia-1-1-2023/>

*Työ- ja elinkeinoministeriö.* 2023a. Uusiutuvan energian direktiivistä saavutettu kunnianhimoinen sopu EU:n trilogineuvotteluissa. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://tem.fi/-/uusiutuvan-energian-direktiivista-saavutettu-kunnianhimoinen-sopu-eu-n-trilogineuvotteluissa>

*Työ- ja elinkeinoministeriö.* 2023b. Uusiutuvan energian RED III -direktiivi voimaan marraskuussa – Työryhmä selvittämään bioenergian kestävyteen liittyvän lainsäädännön muutostarpeita. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://tem.fi/-/uusiutuvan-energian-red-iii-direktiivi-voimaan-marraskuussa-tyoryhma-selvittamaan-bioenergian-kestavyteen-liittyvan-lainsaadannon-muutostarpeita>

*Verohallinto.* 2023a. Maakaasun ja biokaasun valmistevero. WWW-dokumentti. Päivitetty 30.5.2023. Saatavissa: [https://www.vero.fi/yritykset-ja-yhteisot/verot-ja-maksut/valmisteverotus/Maakaasu\\_biokaasu\\_valmistevero/](https://www.vero.fi/yritykset-ja-yhteisot/verot-ja-maksut/valmisteverotus/Maakaasu_biokaasu_valmistevero/)

*Verohallinto.* 2023b. Sähkön, maakaasun, biokaasun, polttoturpeen, kivihiilen ja mäntyöljyn verotaulukot. WWW-dokumentti. Päivitetty 18.1.2023. Saatavissa: <https://www.vero.fi/yritykset-ja-yhteisot/verot-ja-maksut/valmisteverotus/sahkovero/verotaulukot/>

# MÄDÄTEJÄÄNNÖSTEN DEMONSTRAATIOKOKKEET INFRAPUNAKUIVAIMELLA

Lauri Turmola

Usein biokaasureaktoreiden mädätejäännöstä voidaan käyttää maanparannusaineena tai lannoitteena, mutta ilman jatkokäsittelyä mädätejäännös ei aina sovellu sellaisenaan viljelijöiden tarpeisiin. BioCir-hankkeessa demonstroitiin mädätejäännösten jatkojalostusta lannoitteeksi infrapuna-kuivaimella. Kokeet tehtiin Nanopar Oy:n toimittamalla demonstraatiomittakaavassa toimivalla Paskier-prosessiin perustuvalla kuivaimella, joka oli investoitu BioLuuppi-hankkeessa. BioCir- ja BioLuuppi-hankkeiden päärahoittaja on Etelä-Savon ELY-keskus Euroopan aluekehitysrahastosta.

Paskier-prosessi perustuu vakuumiavusteiseen infrapunateknologiaan ja on orgaanisten lietteiden kuivaamiseen tehokkaampi kuin mikään muu tämänhetkinen kuivausteknologia. BioLuuppi-demonstraatioympäristöön toimitettu kuivain on 40 jalan merikonttiin asennettu demonstraatiomittakaavassa toimiva kuivain, joka koostuu infrapunakuivaimesta, jauhimesta, sekoittajasta ja granulaattorista (kuva 1).



KUVA 1. Paskier-prosessiin perustuva infrapunakuivain (kuva Lauri Turmola).



Kokeiden tarkoituksena oli kuivata mädätejäännöksiä ja tuotteistaa ne lannoittaviksi kuivarakeiksi. Kokeissa kuivattiin BioSairila Oy:n kuivareaktoreiden mädätejäännöksiä. Kokeissa kuivattiin jäteveden mädätysjäännöstä ilman tukiainetta ja tukiaineen kanssa sekä biojätteen mädätysjäännöstä.

Demonstraatiokokeet aloitettiin mittaamalla jäteveden mädätysjäännöksen kuiva-ainepitoisuus, joka oli 11,25 prosenttia. Tämän jälkeen kuivaimen syötettiin suoraan reaktorin päästä otettua jäteveden mädätysjäännöstä. Kokeessa huomattiin, että jätevesimädätettä ei pystytty käyttämään prosessissa ilman tukiainetta sen koostumuksen takia. Ilman tukiainetta jätevesimädäte alkoi palamaan laitteiston teräshihnaan kiinni, ja kokeita jatkettiin sekoittamalla mädätteen sekaan tukiainetta helpottamaan kuivausta. Tukiaineiksi valikoitui turve ja biojätteen mädätysjäännöksen separoitu kuivajae.

Jätevesimädätteen kuiva-ainepitoisuutta ja koostumusta muutettiin turpeella ja koe suoritettiin 1:1 (m<sup>3</sup>) suhteella, jossa puolet oli jätevesimädätettä ja puolet turvetta. Tällä suhteella onnistuttiin kuivaamaan kyseinen sekoitus 80,9 prosentin kuiva-ainepitoisuuteen (kuva 2). Turpeen lisäksi tukiaineena käytettiin biojätteen mädätysjäännöksestä separoitua kuivajae. Tällä tukiaineella toteutettiin koe, jossa käytettiin myös 1:1 (m<sup>3</sup>) suhdetta, ja sekoitus onnistuttiin kuivaamaan 74 prosentin kuiva-ainepitoisuuteen. Kuivaimella tehtiin myös koe, jossa haluttiin tutkia biojätteen mädätysjäännöksestä separoidun kuivajakeen kuivaamista ja rakeistamista. Kyseinen jae onnistuttiin kuivaamaan 85 prosentin kuiva-ainepitoisuuteen. Kaikista kuivatuista materiaaleista puristettiin pellettejä jatkotutkimuksia varten.

Paskier-prosessin veden haihdutusteho on keskimäärin 2 l/kWh, ja sen käyttökustannuksista 95 prosenttia koostuuikin sähkönkulutuksesta. Vaikka kemiallisten lannoitteiden hinnat ovat nousseet jyrkästi, ei infrapunakuivaimella kuivatun ja rakeistetun lannoitteen hinta myynnissä riitä kattamaan jalostukseen käytettäviä varoja ilman hyvin halpaa energiaa.



KUVA 2. Kuivattua jätevesimädäte-/turvesekoitusta (kuva Lauri Turmola).

## Jätevesimädätteen laskeutus-, saostus- ja sekoituskokeet

Biokaasun tuotantolaitokset varastoivat tavallisesti mädätysjäännöksestä separoitua kuivajaetta aumoissa. Normaalisti tällaisissa aumoissa lämpötilan nousemista tai kompostoitumista ei enää tapahdu. Kuitenkin jakeet pystytään jälkistabiloimaan ilmaistamalla aumat tukiaineen avulla. BioCir-hankkeessa tutkittiin, voidaanko tällaista tekniikkaa soveltaa jätevesimädätteen jatkojalostuksessa ja täyttyvätkö orgaanisen maanparannusaineen ravinteiden ja muiden ominaisuuksien vähimmäispitoisuudet tällaisella tekniikalla.

## Jäteveden mädätysjäännöstä yritettiin kiinteyttää saostamalla ja laskeuttamalla

Kokeet aloitettiin jätevesimädätteen laskeutus- ja saostuskokeilla. Koetta varten rakennettiin betonipalikoista 23 x 17 x 1,2 metrin kokoiset, päädyistä aukinaiset altaat. Kokeita tehtiin kolmella eri menetelmällä. Mädätettä siirrettiin altaaseen kuivumaan haihtumalla ja luontaisesti valumalla ilman tukiainetta. Seuraavaksi kuivausta tehostettiin laskemalla mädätteen päälle murskattua puutarhajätettä ja annettiin imeytyä joitakin päiviä. Sen jälkeen tukiaine sekoitettiin pyöräkuormaajalla mädätteen sekaan.

Kolmannessa kokeessa puutarhajätteen tilalle vaihdettiin tukiaineeksi vaneritehtaan kuorimon kuusikuoriketta. Koe aloitettiin levittämällä altaan pohjalle 40 cm:n kerros kuorta ja kuoren päälle laskettiin jäteveden mädätysjäännöstä. Seoksen annettiin kuivahtaa joitakin päiviä ja sen jälkeen aloitettiin kuoren sekoittaminen mädätteen sekaan. Kolmannessa kokeessa kiinteytymistä tapahtui paremmin kuin muissa kokeissa, mutta silti kokeissa ei saavutettu jatkojalostuskelpoisuutta. Kaikissa kokeissa tuli esille sään vaikutus kuivaustulokseen. Pienikin sade nosti vesipitoisuutta ja pilasi saavutetun tuloksen.

## Jätevesimädätteen sekoituskoelä kompostointi

BioCir-hankkeen aikana tehtiin sekoituskoelä, jossa oli tarkoituksena selvittää jätevesimädätteen imeyttämistä turpeeseen. Tavoitteena oli löytää reseptiikka, jossa määdäte-/turvesekoituksen kuiva-ainepitoisuus on tarpeeksi korkea aumaamista ja vanhentamista varten. Koe tehtiin 20 m<sup>3</sup>:n sekoituslaitteistolla (apevaunu).

Vaunun pohjalle mitattiin valittu määrä tukiainetta (turve) ja päälle laskettiin jäteveden mädätysjäännöstä. Materiaaleja sekoitettiin 20 minuuttia tai niin kauan, että massan koostumus alkoi vakiintua (kuva 3).



*KUVA 3. Jätevesimädätteen ja turpeen sekoittaminen vaunulla (kuva Lauri Turmola).*

Massat purettiin asfalttikentille noin 20 cm:n paksuisiksi matoiksi. Tällä tavalla haluttiin tehostaa kuivumista muutama päivä ennen kuin sekoitukset ajettiin isoimpiin aumoihin (kuva 4).



KUVA 4. Aumaan ajettu sekoitus (kuva Lauri Turmola).

Kokeita toteutettiin useita ja useina päivinä. Huomattiin, että jatkojalostuskelpoisuutta osoittivat aumat, joissa turpeen määrä oli huomattavasti suurempi kuin muissa. Näiden aumojen lämpötilan kehitystä seurattiin antureilla ja orgaanisen maanparannusaineen soveltuvuutta arvioitiin orgaanisen maanparannusaineen ja kypsyysanalyysillä.

Aumojen lämpötilat olivat nousujohteisia noin kuukauden ajan, ja lämpötilat nousivat tasaisesti noin 31 °C:seen. Kelien viilentyessä aumojen lämpötilat lähtivät laskuun. Maanparannusaineen analyyseissä tutkittiin raskasmetallipitoisuudet (taulukko 1), ravinteet (taulukko 2) ja kypsyys (taulukko 3). Kypsyyttä tarkasteltiin sekoittamisen ja kolmen kuukauden vanhentamisen jälkeen.

**TAULUKKO 1.** Raskasmetallien pitoisuudet.

	Suurimmat sallitut pitoisuudet (mg/kg ka.)	Pitoisuudet näytteessä (mg/kg ka.)
Arseeni (As)	25	5,4<
Elohopea (Hg)	1,0	0,26
Kadmium (Cd)	1,5	0,36
Kromi (Cr)	300	13
Kupari (Cu)	600	88
Lyijy (Pb)	100	3,1
Nikkeli (Ni)	100	12
Sinkki (Zn)	1500	230

Kokeiden perusteella huomattiin, että jäteveden mädätysjäännöksen aumaaminen ja kompostointi vaativat suuren määrän tukiainetta, kuten turvetta, jotta orgaanisen maanparannusaineen ravinteiden ja muiden ominaisuuksien vähimmäispitoisuudet pystytään saavuttamaan. Lisäksi monille biokaasulaitoksille kompostoimalla toteutettu mädätteen jatkokäsittely voi tuoda suuria investointeja asfalttikenttiin ja kompostoinnin käynnistäviin tukiaineisiin.

**TAULUKKO 2.** Ravinnepitoisuudet.

Ravinteet	Pitoisuudet näytteessä
Kosteus	71,2 %
Orgaanisen aineksen pitoisuus (hehikutushäviönä)	81,3 % ka.
Johtokyky	142 mS/m
pH	8,1
Tilavuuspaino	910 kg/m <sup>3</sup>
Typpi (kok.pit.)	32 g/kg ka.
Typpi (vesiliukoinen)	4,38 g/kg ka.
Fosfori (kok.pit.)	14 g/kg ka.
Fosfori (vesiliukoinen)	570 mg/kg ka.
Kalium (kok.pit.)	2,0 g/kg ka.

**TAULUKKO 3.** Kompostin kypsyyt.

Kypsyyt	Ennen vanhentamista	3 kk vanhentamista
	Näyte	Näyte
Hiilidioksidin tuotto	4,76 mg C/g VS/vrk	1,55 mg C/g VS/vrk
Juurenpituuden indeksi	23 %	44 %
NO <sub>3</sub> -N/NH <sub>4</sub> -N suhde	<0,01	0,10

# KASVATUSKOKEET BIOLUUPISSA VALMISTETUILLE TUOTEAIHIOILLE

Minttu Paakkari & Lauri Turmola & Hanne Soininen

Kasvatuskokeista käytetään myös nimitystä kasvibiotestit. Kasvibiotestejä on olemassa useita, mutta niissä noudatetaan samanlaista toteutusta: testikasvien siemenet kylvetään kasvatusastiassa tutkittavaan tuotteeseen, kasveja kasvatetaan kontrolloiduissa olosuhteissa määrätty aika ja lopuksi kasvatulosta verrataan kontrollinäytteeseen. Kasvatuskokeissa yleisin testiaika on parista viikosta kuukauteen. Kokeissa käytettävien kasvien tulisi olla yleisiä levinneisyydeltään ja lajiominaisuuksiltaan sekä myös riittävän herkkiä reagoimaan kasvutavallaan muutoksiin. (Salo ym. 2013)

Kasvibiotestien tuloksiin vaikuttavat näytteen ominaisuudet, kuten johtokyky, ammonium, ravinteet ja suolat. Mahdolliset haitta-aineet ja taudinaiheuttajat maaperässä lisäävät riskejä, joten niistä tarvitaan lisätietoa ja tutkimuksia. (Maunuksela 2013)

## Tuoteaihioiden materiaaliseokset

Materiaaliseosten kuivaamiseen käytettiin Nanopar Oy:n toimittamaa demonstraatiomittakaavassa toimivaa Paskier-prosessiin perustuvaa kuivainta, joka oli investoitu Metsäsairila Oy:n BioLuuppi-hankkeen osiossa. Kokeissa kuivattiin kuivareaktoreiden mädätejäännöksiä. Paskier-prosessissa kuivattiin jäteveden mädätysjäännöstä tukiaineen kanssa sekä biojätteen mädätysjäännöstä.

Ensimmäinen kasvatuskoesarja toteutettiin 5.–19.9.2023. Kasvatuskokeessa oli mukana neljä koesarjaa: kontrolli (kaupallinen kylvö- ja taimimulta), jätevesimädäte (JVM) ja turve 1:1 sekoituksella, biojätteen mädätysjäännöksen separoitua kuivajaetta sekä jätevesimädätteen ja biojätteen mädätysjäännöksen separoitua kuivajaetta sekoituksella 1:1.

Toinen kasvatuskoesarja toteutettiin 2.–16.10.2023. Tämä kasvatuskoesarja toteutettiin ämpärikokeina, ja siinä oli mukana kolme koesarjaa: kontrolli (kaupallinen kylvö- ja taimimulta), jätevesimädäte ja turve 1:1

sekoituksella sekä jätevesimädäte ja biojätteen mädätysjäännöksen se-  
paroitu kuivajae sekoituksella 1:1.

## Kasvatuskokeiden toteutus

Kasvatuskokeissa hyödynnettiin VTT:n kompostin kypsyystestien ohjetta (Itävaara ym. 2006). Testikasveina käytettiin vihanneskrassia (*Lepidium sa-  
tivum*) ja rehukauraa. Vihanneskrassin siementen itävyys oli 92 prosenttia.

Koesarjassa 1 astioihin mitattiin 1,2 litraa multaa ja 0,3 litraa materiaali-  
seosta. Jokaisesta materiaaliseoksesta tehtiin viisi rinnakkaista näytettä  
(kasvatusastia). Kasvatusastioihin mitattiin 3 dl materiaaliseosta ja materi-  
aali painettiin kevyesti ruukkuihin. Ruukut laitettiin alumiinivuokiin ja niitä  
kasteltiin vesijohtovedellä niin, että vesi tuli ruukkujen läpi. Jokaiseen  
ruukkuun kylvettiin 50 kpl vihanneskrassin siementä (kuva 1). Siemenet  
aseteltiin pinsetillä tasaisesti ruukkuihin ja ne peitettiin vermikuliittirou-  
heella, jotta voitiin varmistaa tasainen itäminen. Lopuksi kasvatusruukut  
peitettiin tuorekelmulla tasaisen kosteuden ja itämisen varmistamiseksi.



KUVA 1. Ylemmässä kuvassa materiaaliseokseen on kylvetty 50 vihannes-  
krassin siementä. Kylvämisen jälkeen pinnalle lisättiin vermikuliittirouhe-  
ta (kuva alla). (kuvat Minttu Paakkari)



Koesarja 2: Ämpärikokeissa käytettiin 1:1 sekoitusta (kuva 2). Jokaiseen ämpäriin punnittiin 0,5 kg multaa ja 0,5 kg näyteseosta. Ämpärit kasteltiin kevyesti ja niihin aseteltiin pinseteillä 75 kpl kauransiemeniä. Siemenet peitettiin vermikuliittirouheella ja ämpäreiden päälle laitettiin tuorekelmu.



*KUVA 2. Ämpäriin lisättiin 75 kappaletta kauransiemeniä. Kylvämisen jälkeen pintaan lisättiin vermikuliittirouhetta ja ämpärit peitettiin tuorekelmulla. (kuva Minttu Paakkari)*

Koesarjan 1 ruukut laitettiin olosuhdekaappiin, jossa oli 16 h kasvuvalot päällä (valoteho 60 %) lämpötilassa +20 astetta. Pimeä aika oli 8 h ja lämpötila +15 astetta (kaapin valot pois päältä). Olosuhdekaapin kosteus oli 70 prosenttia ja ilmanvaihto 40 prosenttia. Kosteusprosentti pudotettiin 40 prosenttiin liiallisen vedenkulutuksen vuoksi kuusi vuorokautta kokeiden alkamisen jälkeen.

Ruukkuja kasteltiin 2–3 päivän välein tarvittaessa 5–20 ml:lla vesijohdettua vettä. Näytteille ei annettu lisäravinteita kokeen aikana. Tuorekelmu poistettiin, kun siemenet olivat alkaneet itämään.

Koesarjan 2 ämpärit pidettiin ikkunalaudalla huoneenlämmössä, jolloin ne saivat päivänvaloa. Ämpäreitä kasteltiin 2–3 päivän välein tarvittaessa vesijohtovedellä. Näytteille ei annettu lisäravinteita kokeen aikana. Tuorekelmu poistettiin, kun siemenet olivat alkaneet itämään.

## Itävyyden laskennallinen tarkastelu

Kasvatuskokeiden aikana seurattiin näytteiden taimettumista ja taimien kasvua seitsemän vuorokautta kasvatuskokeiden aloituksesta. Jokaisen ruukun taimet laskettiin ja kuvattiin. Siementen itävyys laskettiin seuraavasti (kaava 1):

*Kaava 1. Itävyysprosentti = itäneet siemenet (kpl) / kylvetyt siemenet (kpl) · 100 %.*

14 vuorokautta kylvöstä taimet leikattiin tarkasti mullan pinnasta, minkä jälkeen määritettiin taimien tuorepaino ja kuiva-ainepitoisuus. Lisäksi jokainen ruukku kuvattiin, jotta voitiin tehdä jälkeinpäin havaintoja kasvin koosta, ulkonäöstä ja mahdollisista poikkeavuuksista. Kasvuindeksi laskettiin kuivapainoa kohden seuraavasti (kaava 2):

*Kaava 2. Kasvuindeksi = kasvu näyteseoksessa (g) / kasvu taustakontrollissa (g) · 100 %.*

## Analyysimenetelmät

Valmiista tuoteseoksista määritettiin pH, johtokyky ja kuiva-ainepitoisuus. pH- ja johtokykymäärittämiä varten tuotteista valmistettiin vesisuspensiot 1:5 massasuhteessa punnitsemalla 10 g näytettä ja lisäämällä 50 ml ultrapuhdasta vettä. Seoksia ravisteltiin 30 minuutin ajan tasoravistelijassa huoneenlämmössä, minkä jälkeen näytteet analysoitiin.

Kuiva-ainemääritys tehtiin standardin SFS-EN 13040 mukaisesti +103 °C ± 2 °C:n lämpötilassa. Tyhjä ja hehkutettu upokas punnittiin, minkä jälkeen upokkaaseen annosteltiin näytettä ja punnittiin yhdessä astian kanssa. Näytteitä kuivattiin +105 °C:n lämpötilassa uunissa yön yli. Näytteet jäähdytettiin eksikaattorissa, minkä jälkeen punnittiin kuivatun näytteen paino. Näytteistä tehtiin kolme rinnakkaista määrittystä.

Itäneiden kasvien kuivapaino määritettiin kuivattamalla kasvit tyhjässä ja esihelkuteetussa alumiinivuoassa +70 asteessa yön yli. Tämän jälkeen määritettiin kuivuneiden kasvien ja astian yhteispaino, josta vähennettiin ennalta määritelty tyhjän astian massa.

## Koesarjojen tulokset

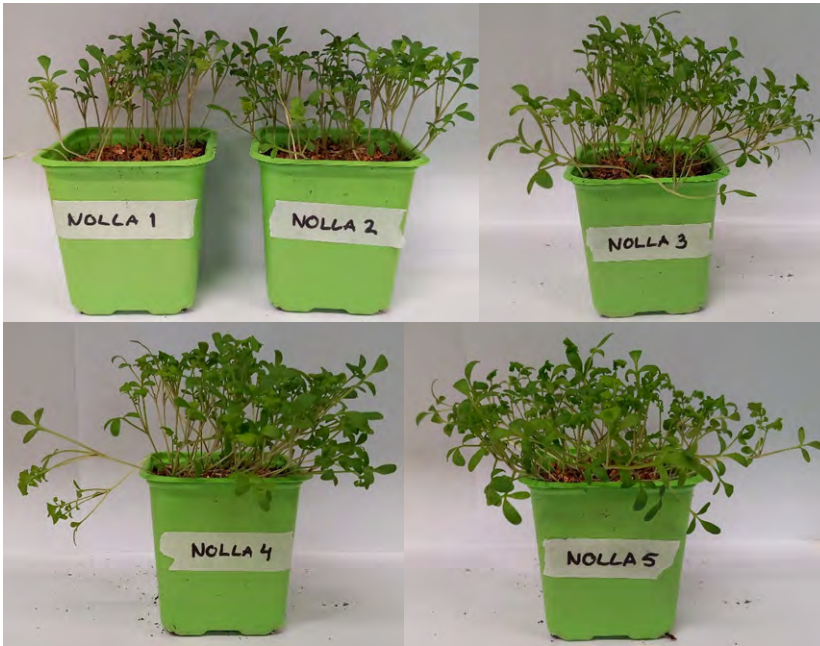
Ensimmäisen koesarjan kontrollissa itävyys oli 91,3 prosenttia. Muiden ruukkujen itävyys oli 90–94 prosenttia. Kasvuindeksi oli varsin korkea. Biojätteen kuivajae sekä jätevesimädäte + biojätteen kuivajae kasvoivat reilusti, jätevesimädäte + turve kasvoi hieman hitaammin.

Koesarjassa 2 kontrollin itävyys oli kaikista parhain. Jätevesimädätteen ja biojätteen kuivajakeen itävyys oli alle 15 prosenttia ja kasvuindeksi alle kahdeksan prosenttia. Jätevesimädätteen ja turpeen itävyys oli 68 prosenttia, ja kasvuindeksi jäi 53 prosenttiin. Jätevesimädätteen + biojätteen mädätysjäännöksen separoitu kuivajae lähti itämään hitaasti.

**TAULUKKO 1.** Vihanneskrassin ja kauran itävyys ja kasvuindeksi materiaaliseoksissa sekä taustakontrollissa laboratoriomittakaavan kasvatuskokeessa.

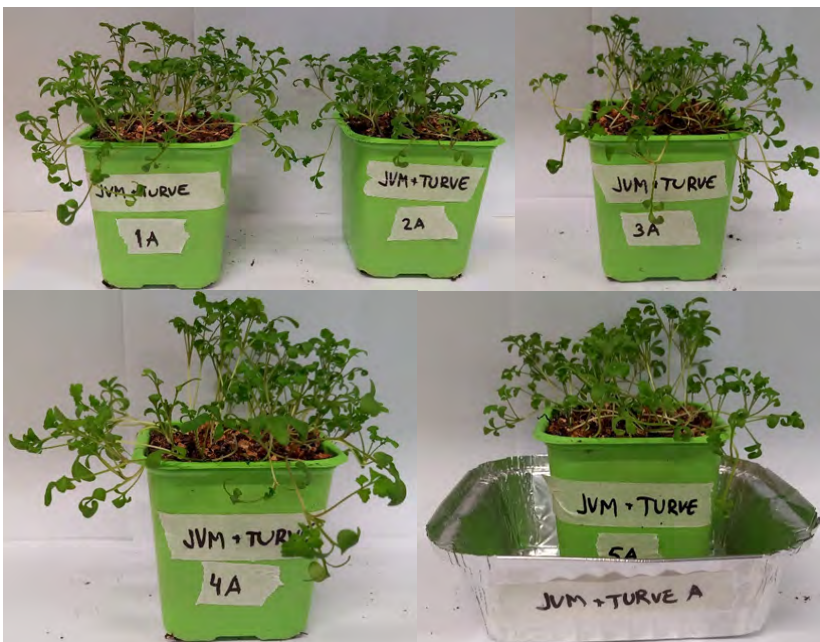
Materiaaliseos	Itävyys (%)	Kasvuindeksi (%)
<b>Koesarja 1</b>		
Kontrolli	91,3	-
JVM + turve	80	77,6
Biojätteen mädätysjäännöksen separoitu kuivajae	90,8	114,2
JVM + biojätteen mädätysjäännöksen separoitu kuivajae	89,2	110,9
<b>Koesarja 2</b>		
Kontrolli	91,5	-
JVM + turve	68,4	53,2
JVM + biojätteen kuivajae	14,7	7,5

Kuvassa 3 on kontrollikokeessa kasvatetut vihanneskrassit 14 vuorokautta kokeen aloittamisesta. Kaupallinen taimi- ja kylvömulta soveltui hyvin koejärjestelyyn. Kasvuindeksi oli 91,3 prosenttia.



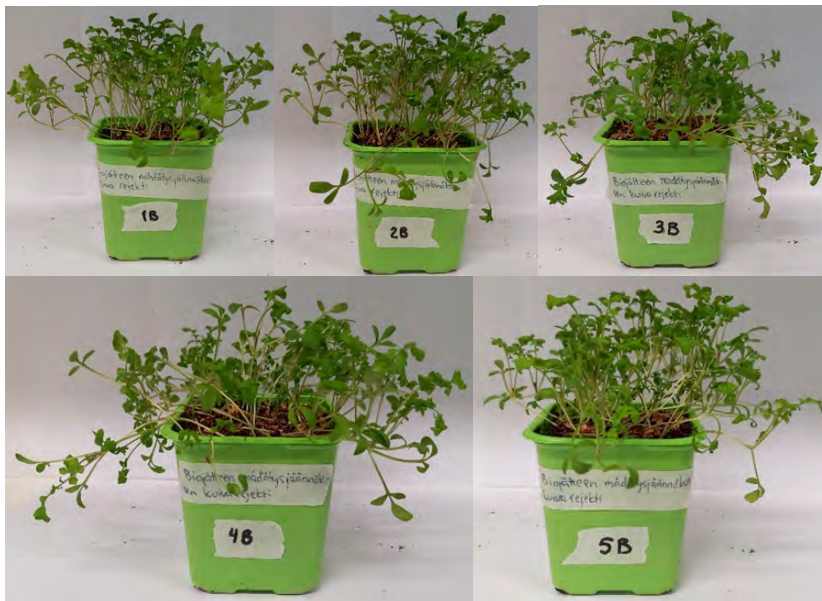
KUVA 3. Kontrollituotteessa kasvatetut vihanneskrassit 14 vrk siementen kylvämisen jälkeen (kuvat Minttu Paakkari).

Kuvassa 4 on jätevesimädäte + turve -seoksessa ja kaupallisessa tuotteessa (1 osa tuoteaihiota ja 5 osaa kaupallista tuotetta) kasvatetut vihanneskrassit 14 vuorokautta kokeen aloittamisesta. Kasvuindeksi oli tällä seoksella 80 prosenttia.



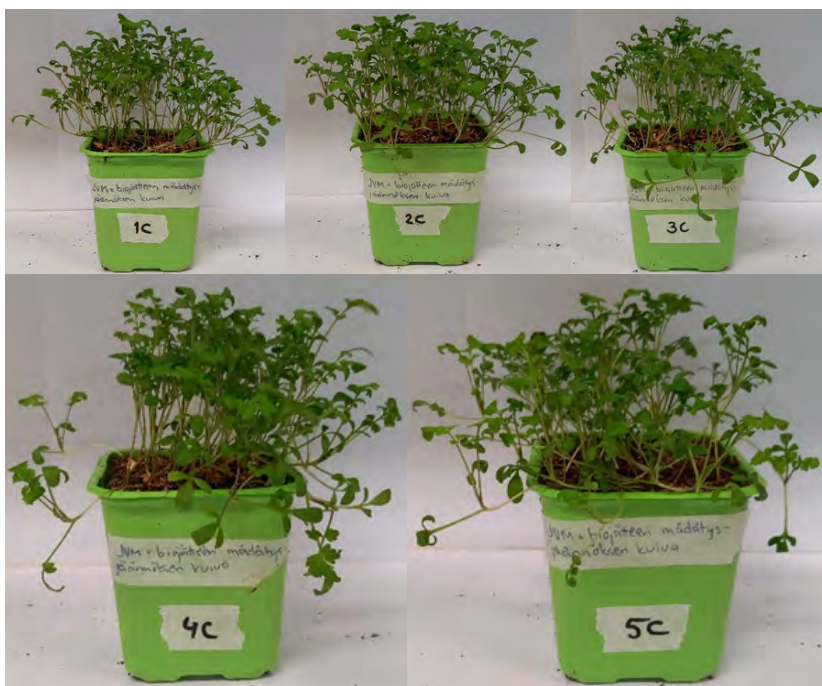
KUVA 4. Jätevesimädäte + turve -seoksessa ja kaupallisessa tuotteessa (1:5) kasvatetut vihanneskrassit 14 vrk siementen kylvämisen jälkeen (kuvat Minttu Paakkari).

Kuvassa 5 on biojätteen mädätysjännöksen separoitu kuivajae seoksessa (1 osa tuoteaihiota ja 5 osaa kaupallista tuotetta) kasvatetut vihanneskrassit 14 vuorokautta kokeen aloittamisesta. Tuoteaihiota soveltui hyvin koejärjestelyyn. Kasvuindeksi oli tällä seoksella 90,8 prosenttia.



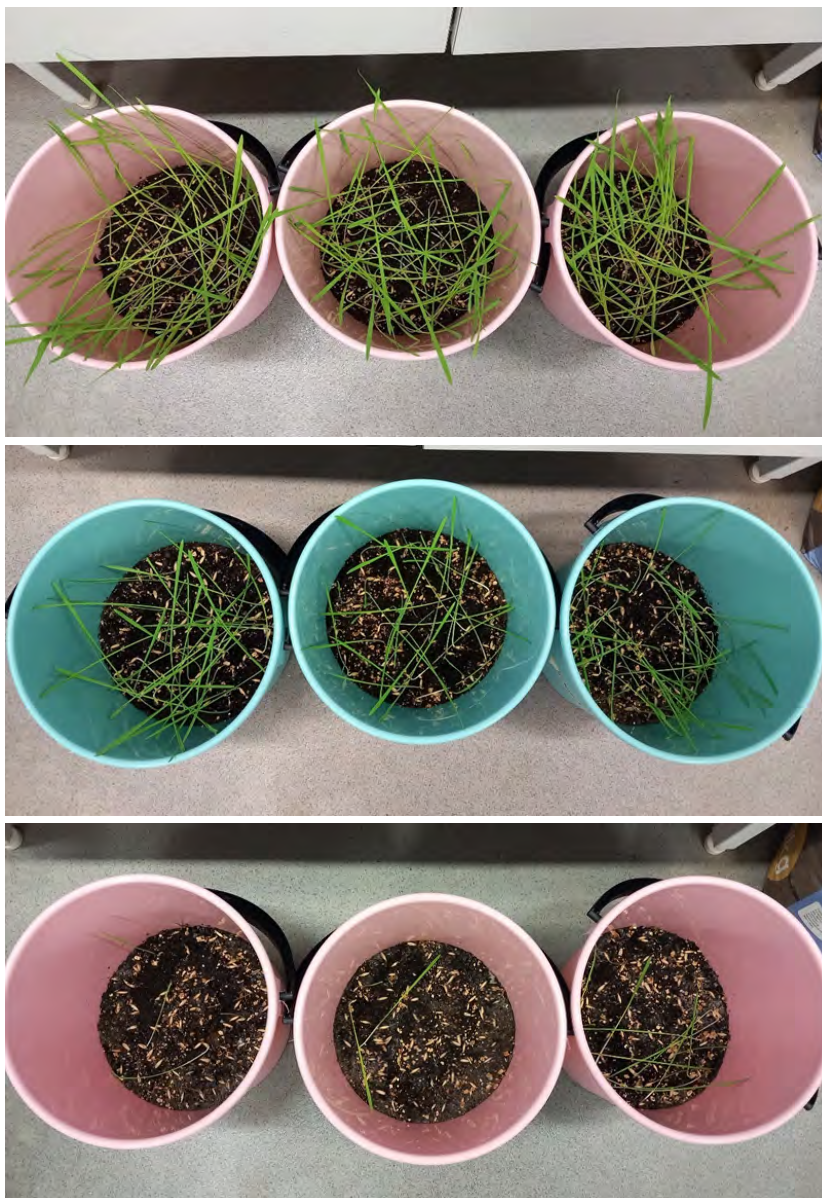
*KUVA 5. Biojätteen mädätysjännöksen separoitu kuivajae (1:5) -pohjaisessa alustassa kasvatetut vihanneskrassit 14 vrk siementen kylvämisen jälkeen (kuvat Minttu Paakkari).*

Kuvassa 6 on jätevesimädäte + biojätteen mädätysjännöksen separoitu kuivajaseoksessa (1 osa tuoteaihiota ja 5 osaa kaupallista tuotetta) kasvatetut vihanneskrassit 14 vuorokautta kokeen aloittamisesta. Kasvuindeksi oli tässä koesarjassa 89,2 prosenttia.



*KUVA 6. Jätevesimädäteen + biojätteen mädätysjäännöksen separoitu kuivajae (1:5) -pohjaisessa seoksessa kasvatetut vihanneskrassit 14 vrk siementen kylvämisen jälkeen (kuvat Minttu Paakkari).*

Toinen koesarja tehtiin käyttämällä seossuhdetta 50 prosenttia tuoteaihiota ja 50 prosenttia kaupallista tuotetta. Kuvassa 7 on ylhäällä jätevesimädäteen + biojätteen mädätysjäännöksen separoitu kuivajae -seos 14 vuorokautta kokeen aloittamisen jälkeen. Kuvassa on keskellä jätevesimädäteen ja turve seostuoteaihiota ja alhaalla jätevesimädäteen + biojätteen mädätysjäännöksen separoitu kuivajae -seoksessa kasvatetut kaurat 14 vuorokautta kokeen aloittamisesta.



*KUVA 7. Kuvassa ylhäällä kontrollituotteessa, keskellä jätevesimädäte + turve -pohjaisessa seoksessa ja alhaalla jätevesimädäte + biojätteen mädätysjäännöksen separoidussa kuivajae -pohjaisessa seoksessa kasvatetut kaurat 14 vrk siementen kylvämisen jälkeen (kuvat Minttu Paakkari).*

Tuotteistetuille materiaaliseoksille tehtiin analyysjä ennen kasvatuskokeiden aloittamista ja niiden päätyttyä. Materiaaleista määriteltiin niiden pH, johtokyky, kuiva-ainepitoisuus (TS), hehkutushäviö (VS) sekä kuiva-tyypipitoisuus. Taulukossa 2 ja 3 on esitetty analyysien tulokset tuotteille sekä kontrollina käytetyille kaupalliselle kylvö- ja taimimullalle.

**TAULUKKO 2.** Materiaaliseosten pH ja johtokyky ennen ja jälkeen kasvatuskokeiden.

Materiaaliseos	Ennen kasvatuskoetta		Kasvatuskokeen jäl- keen	
	pH	Johtokyky (mS/cm)	pH	Johtokyky (mS/cm)
<b>Koesarja 1</b>				
Kontrolli	6,51	0,81	6,29	0,82
JVM + turve	7,17	2,29	5,15	2,26
Biojätteen mädätysjäännök- sen separoitu kuivajae	7,88	3,96	7,04	1,46
JVM + biojätteen mädätysjäännök- sen separoitu kuivajae	7,91	3,34	5,92	1,42
<b>Koesarja 2</b>				
Kontrolli	6,05	0,79	6,32	0,62
JVM + turve	6,35	2,37	5,83	2,01
JVM + biojätteen mädätysjäännök- sen separoitu kuivajae	6,88	2,64	6,15	2,44

Kokeiden aikana koesarjassa 1 pH laski JVM + turve -seoksessa ja JVM + biojätteen mädätysjäännökseen separoidun kuivajakeen kohdalla. Kontrollissa ja biojätteen mädätysjäännökseen separoidussa kuivajakeessa oli pienimmät erot. Johtokyky laski eniten biojätteen mädätysjäännökseen separoidulla kuivajakeella sekä JVM + biojätteen mädätysjäännökseen separoidulla kuivajakeella. Kontrollissa oli pieni nousu ja JVM + turpeella pieni lasku. Kuiva-ainepitoisuus (TS) laski jokaisessa näytteessä kokeiden aikana paitsi kontrollissa. Hehkutushäviö (VS) laski jokaisessa näytteessä paitsi kontrollissa.

Koesarjan 2 materiaalseoksille tehtiin analyysjä ennen kasvatuskokeiden aloittamista ja niiden päätyttyä. Materiaaleista määritettiin pH, johtokyky, kuiva-ainepitoisuus (TS), hehkutushäviö (VS) sekä kuivatypipitoisuus. Taulukossa 2 ja 3 on esitetty tulokset JVM + turve -seokselle, JVM + biojätteen mädätysjäännökseen separoidulle kuivajakeelle sekä kontrollina käytetyille kaupalliselle kylvö- ja taimimullalle. pH laski molemmilla materiaalseoksilla, mutta kontrollilla se nousi hieman. Johtokyky laski jokaisella seoksella. Kuiva-ainepitoisuus (TS) laski jokaisella



seoksella. Hehkutushäviö (VS) laski myös jokaisella seoksella. Kuivatyp-  
pitoisuus laski molemmilla materiaaliseoksella.

**TAULUKKO 3.** Materiaaliseosten TS (%) ja VS (%) ennen ja jälkeen  
kasvatuskokeiden sekä kuivatypipitoisuus ennen ja jälkeen kuivaamisen.  
\*vesiliukoinen typpi

Materiaali- seos	Ennen kasva- tuskoetta		Kasvatuskoe- keen jälkeen		Ennen infrapuna- kuivausta	Infrapuna- kuivaauk- sen jälkeen
	TS (%)	VS (%)	TS (%)	VS (%)	Kuiva typpi- pitoisuus (g/kg)	Kuiva typpi- pitoisuus (g/kg)
<b>Koesarja 1</b>						
Kontrolli	45,13	16,81	53,97	18,9	0,42*	-
JVM + turve	85,32	66,4	45,74	26,01	26,19	29,33
Biojätteen mädätys- jäännöksen separoitu kuivajae	85,58	57,56	55,31	29,13	28,56	29,24
JVM + biojät- teen mädätys- jäännöksen separoitu kuivajae	83,2	53,52	49,66	25,22	44,54	30,08
<b>Koesarja 2</b>						
Kontrolli	45,13	16,81	27,88	12,55	0,42*	-
JVM + turve	54,67	36,8	34,57	22,99	26,19	29,33
JVM + biojät- teen mädätys- jäännöksen separoitu kuivajae	66,88	40,84	38,27	21,84	44,54	30,08

## Johtopäätökset

Näissä kokeiden tuloksena voidaan todeta, että materiaaliseokset toimivat koemateriaalina paremmin 1:5 seoksella kuin 1:2 seoksella. Itävyys ja kasvuindeksi olivat parempia ensimmäisellä koesarjalla. Kasvatuskokeen 2 osalta olisi todennäköisesti tarvittu pidempi kasvatusaika ja optimaalisemmat kosteusolosuhteet, jotta tuloksia voitaisiin verrata koesarjan 1 tuloksiin. Koesarjassa 1 oli käytössä kasveille optimaalisimmat olosuhteet valon ja kosteuden osalta.

Mädätepohjaiset tuoteaihiot vaativat vielä lisätutkimuksia ja kehittämistyötä. Uudenlaisista tuoteaihioista kannattaa tehdä analyysien lisäksi myös kasvatuskokeita sekä varmistua myös ekotoksisuudesta. Metsäsairilan BioLuuppi-ympäristö mahdollistaa jatkossa uudenlaisten tuotteiden valmistamisen ja testaukset.

## LÄHTEET

*Itävaara, M., Vikman, M., Kapanen, A., Venelampi, O. & Vuorinen, A.* 2006. Kompostin kypsyystestit – Menetelmäohjeet. VTT tiedotteita – Research notes 2351. ISBN 951.38.6814.1. Saatavissa: <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/tiedotteet/2006/T2351.pdf>

*Maunuksela, L.* 2013. Biokaasulaitosten lopputuotteiden laadunvalvonta – biotestien hyödyntäminen. PDF-dokumentti. Saatavissa: [http://www.mtt.fi/wwwdoc/kestavastikiertoon/Maunuksela\\_Biotestit.pdf](http://www.mtt.fi/wwwdoc/kestavastikiertoon/Maunuksela_Biotestit.pdf)

*Salo, T., Palojärvi, A., Kukkonen, S., Vestberg, M., Kapuinen, P., Tontti, T., Ylivainio, K., Parikka, P., Nummila, M., Maunuksela, L., Lindström, K., Orasmaa, S. & Paulin, L.* 2013. Orgaanisten lannoitevalmisteiden vaikutus kasvien kasvuun – testimenetelmät. MTT Raportti 101. ISBN: 978-952-487-468-7. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-487-468-7>

# BIOLUUPIN TUOTEAIHIOIDEN EKOTOKSISUUS

Minttu Paakkari & Vuokko Malk

Mädätysjäännös voi olla myrkyllistä maaperän eliöille muun muassa ammoniakkin, suolojen, haihtuvien orgaanisten yhdisteiden ja raskasmetallien takia. Lisäksi lannoitteiden liiallinen levittäminen maahan voi aiheuttaa kuormitusta pohjaveteen ja vesistöihin. (Franchino ym. 2016)

Ekotoksisuustesteillä tutkitaan haitta-aineiden vaikutusta ympäristöön ja siellä eläviin eliöihin. Mädätteiden ekotoksisuutta on tutkittu muun muassa kasveilla, lieroilla, vesieliöillä ja valobakteereilla. Useimmat tutkimukset on tehty maatalousperäisillä mädätteillä, mutta ekotoksisuutta on tutkittu myös esimerkiksi ruokajätteen mädätteestä. (Pivato ym. 2016, Natalio ym. 2021)

BioCir-hankkeessa tutkittiin BioLuupin tuoteaihioiden ekotoksisuutta. Testimenetelmäksi valittiin *Aliivibrio fischeri* -toksisuustesti.

## Tutkitut näytteet

Ekotoksisuuskokeissa tutkitut tuoteaihiot olivat samat kuin BioCir-hankkeen kasvatuskokeissakin:

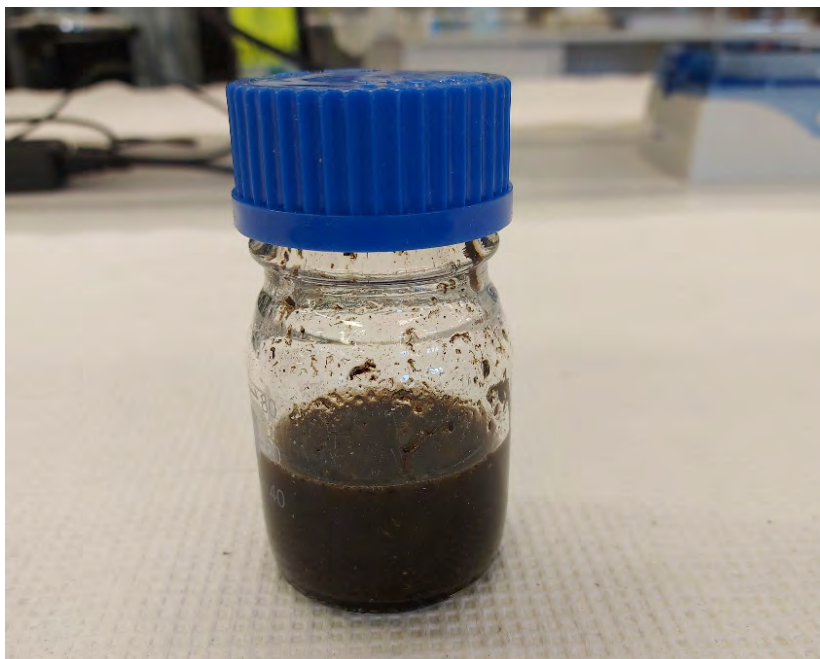
- jätevesimädätteen (JVM) ja turpeen seos
- jätevesimädätteen ja biojätteen mädätysjäännöksen separoidun kuivajakeen seos
- biojätteen mädätysjäännöksen separoitu kuivajae.

Näytteistä analysoitiin muun muassa pH ja johtokyky kasvatuskokeiden yhteydessä.

## Testin toteutus

Testit toteutettiin standardin SFS-ISO 21338 mukaisesti. Testeissä käytettiin BioTox™-kittä (Aboatox Oy, Turku).

Ekotoksisuustestejä varten materiaaliseoksista valmistettiin suspensiot ultrapuhtaaseen veteen kymmenen prosentin massasuhteessa (kuva 1). Näytteitä ravisteltiin tasoravistelijassa 30 minuutin ajan ja sekoitettiin lusikalla. Näytteistä valmistettiin kaksi rinnakkaista suspensiota.



KUVA 1. Biojätteen mädätysjäännöksen separoidusta kuivajakeesta valmistettu kuivajae-vesi-suspensio (kuva Minttu Paakkari).

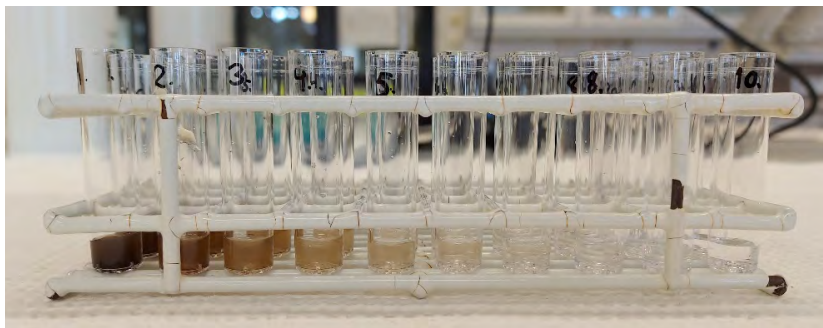
## Näytteiden pH:n ja NaCl-pitoisuuden säätö

Testissä pH:n tulee olla 6–8,5, joten näytteiden pH mitattiin ja NaCl-pitoisuus säädettiin. Jos pH poikkeaa annetusta arvosta, tulee se säätää välille  $7 \pm 0,2$  tai alueen ylä- tai alarajalle (SFS-ISO 21338). Biojätteen mädätysjäännöksen separoidun kuivajakeen pH oli 9,0. pH säädettiin alemmaksi 1,5 mmol HCl:llä. Lopullinen pH oli 8,2. Muiden näytteiden pH:t olivat sopivat.

Näytteiden NaCl-pitoisuuden tulee olla kaksi prosenttia. NaCl-pitoisuus säädettiin lisäämällä 50 ml:n näytetilavuuteen 1 gramma NaCl:a. Ekotoksisuusmittaukset tehtiin saman päivän aikana.

## Laimennossarjojen valmistus

Näytteistä valmistettiin laimennossarjat (kuva 2). Laimennokset tehtiin mittauskyvetteihin, ja lopullinen tilavuus oli 400 µl. Jokaisesta näytteestä tehtiin kaksi rinnakkaista laimennossarjaa luminesenssimittausta varten.



KUVA 2. Biojätteen mädätysjäännöksen separoidusta kuivajakeesta valmistetun suspension laimennossarja (kuva Minttu Paakkari).

## Luminesenssin mittaus

BioTox-kitti sisältää kylmäkuivatun bakteerin, joka ”herätellään” sekoittamalla siihen laimennusreagenssi. Bakteeriliuoksen annetaan olla 45 minuuttia jääkaapissa, minkä jälkeen sen annetaan stabiloitua vähintään 30 minuuttia 15 °C:ssa inkubaattorissa.

Bakteerisuspensio injektoidiin näytteisiin luminometrin (Berthold LB 9526 Sirius 2 Single Tube Luminometer) annostelijalla alkutilannemittauksen yhteydessä. Luminometri mittaa valontuoton siitä hetkestä lähtien, jolloin bakteerisuspension annostelu näytteeseen alkaa, ja sitä jatketaan viisi sekuntia. Kontaktiajan (30 min) jälkeen valontuotto mitattiin uudelleen kyveteistä samassa järjestyksessä kuin alkutilanteessa. Mittausparametrit olivat samat kuin alkutilanteessa, mutta ilman bakteerin injektointia. Referenssiliuoksena käytettiin 3,5-dikloorifenolia (C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>OCl<sub>2</sub>) ja kontrollina 2 % NaCl-liuosta (pH 7 ± 0,2).

## Tulokset

Tulokset laskettiin standardin SFS-ISO 21338 mukaisesti käyttäen Aboa-Tox Oy:n toimittamaa Excel-laskentapohjaa. Kontrollinäytteen luminesenssiarvoista laskettiin korjauskerroin (KF-arvo), joka osoittaa, kuinka paljon luminesenssin tuotto muuttuu kontrollinäytteessä kontaktiajan aikana (kaava 1). Näytteiden tulosten perusteella laskettiin luminesenssin inhibitioprosentit (kaava 2). Laite mittasi luminesenssin intensiteettiä 0,1 sekunnin välein viiden sekunnin ajan. Luminesenssin intensiteettiarvona (huippuarvo) käytettiin aikavälin 1,8–2,4 sekuntia keskiarvoa, joka oli määritetty laitetoimittajan kanssa sopivaksi mittausalueeksi.

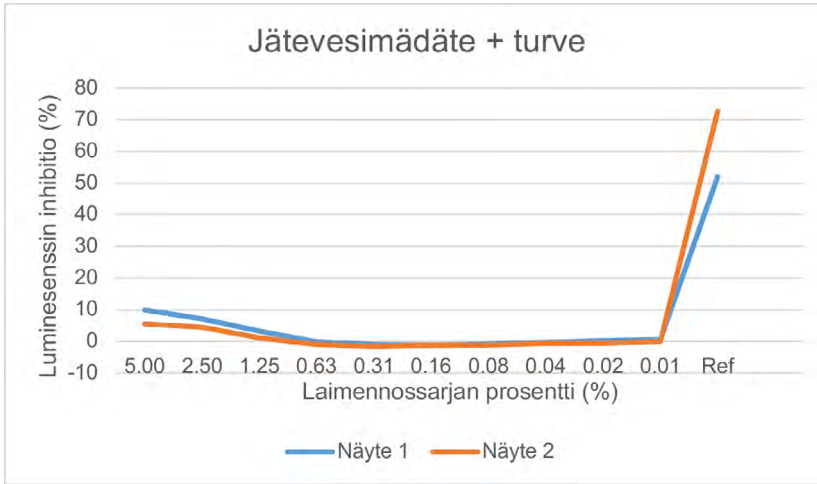
*Kaava 1:*  $KF = IC30 / IC0$

*Kaava 2:*  $INH\% = 100 - 100 \times IT30 / (KF \times ITO)$

KF	Korjauskerroin (rinnakkaisten kontrollinäytteiden keskiarvo)
IC30	Luminesenssin intensiteetti kontrollinäytteessä 30 minuutin kontaktiajan jälkeen
IC0	Luminesenssin intensiteetti kontrollinäytteessä alkutilanteessa
INH%	Luminesenssin inhibitio testinäytteessä
IT30	Luminesenssin intensiteetti testinäytteessä 30 minuutin kontaktiajan jälkeen
ITO	Luminesenssin intensiteetti testinäytteessä alkutilanteessa

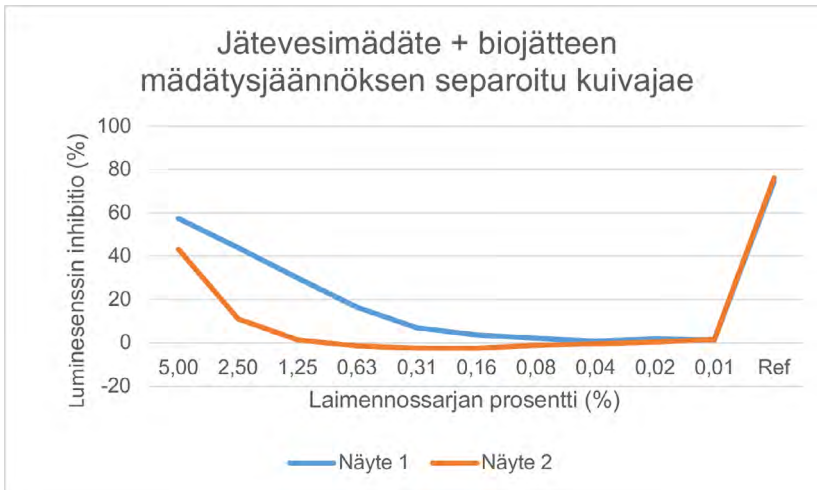
## Tulokset ja niiden tarkastelu

Jätevesimädätteen ja turpeen seoksessa luminesenssin inhibitiot olivat hyvin alhaisia eli toksisuus oli vähäistä (kuva 3). EC50-arvo oli 50,60–58,96 prosenttia, mutta arvo ei ole kovin luotettava, koska se on selvästi korkeampi kuin vahvin laimennos. Vahvimman laimennoksen inhibitio oli alle kymmenen prosenttia, ja inhibitiot laskivat laimennossarjan myötä.



KUVA 3. Luminesenssin inhibitio jätevesimädätteen ja turpeen seoksen laimennossarjassa.

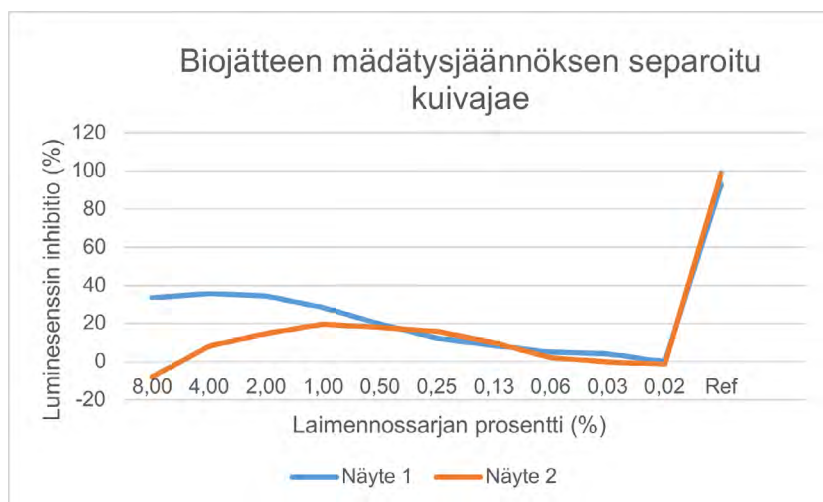
Jätevesimädätteen ja biojätteen mädätysjäännöksestä separoidun kuivajakeen seoksen EC50-arvo oli 4,65–5,37 prosenttia (kuva 4). Ensimmäisen näytteen vahvimmassa laimennoksessa luminesenssin inhibitio oli melkein 60 prosenttia, ja laimennosten kasvaessa inhibitio lähti laskemaan tasaisesti.



KUVA 4. Luminesenssin inhibitio jätevesimädätteen ja biojätteen mädätysjäännöksestä separoidun kuivajakeen seoksen laimennossarjassa.



Kuivajakeen (kuva 5) ensimmäisen rinnakkaisnäytteen inhibitioprosentit olivat alle 40 prosenttia. EC50-arvo oli 11,98 prosenttia. Näytteen 2 vahvimman laimennoksen inhibitioprosentit olivat negatiiviset, eikä näytteessä havaittu selvää annos-vaste-vaikutusta, joten tulosten perusteella ei voitu laskea EC50-arvoa. Inhibitioprosentit olivat kaikissa laimennoksissa alhaiset. Hajonta rinnakkaisnäytteiden välillä johtuu todennäköisesti kuivajakeen heterogeenisyydestä.



KUVA 5. Luminesenssin inhibitiot biojätteen mädätysjäännöksestä separoidun kuivajakeen laimennossarjassa.

EC50-arvot näytteille olivat 4,65–58,69 prosenttia (taulukko 1). Alhaisin EC50-arvo eli toksisin tulos oli seoksessa, joka sisälsi jätevesimädätettä ja biojätteen mädätysjäännöksestä separoitua kuivajakeetta. Korkein EC50-arvo eli alhaisin toksisuus oli jätevesimädätteen ja turpeen sekoituksella.

**TAULUKKO 1.** Materiaaliseoksista mitatut EC50-arvot, pH, johtokyky sekä kuivatyyppipitoisuus.

Näyte	EC50	pH	Johtokyky (mS/cm)	Kuivatyyppi-pitoisuus (g/kg)
JVM + turve	50,60–58,96	6,31	2,44	37,07
JVM + biojätteen mädätysjäännöksen separoitu kuivajae	4,65–5,37	6,13–7,13	1,71–2,20	44,54
Biojätteen mädätysjäännöksen separoitu kuivajae	11,98	8,2	2,30	24,1

Testien tuloksia voidaan pitää luotettavina, sillä kontrollinäytteiden KF-arvot (0,74–0,93) olivat standardin mukaiset (standardin KF-arvo 0,6–1,8, ISO 21338) ja referenssinäytteissä havaittiin selvä luminesenssin inhibitio.

## LÄHTEET

*Franchino, M., Tigini, V., Varese, G.C., Sartor, R.M. & Bona, F.* 2016. Microalgae treatment removes nutrients and reduces ecotoxicity of diluted piggery digestate. *Science of The Total Environment* 569–570, 40–45. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.100>

*Natalio, A., Back, M., Richards, A. & Jeffery, S.* 2021. The effects of saline toxicity and food-based AD digestate on the earthworm *Allolobophora chlorotica*. *Geoderma* 383. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115005>

*Pivato, A., Vanin, S., Raga, R., Lavagnolo, M., Barausse, A., Rieple, A., Alexis Laurent, A. & Cossu, R.* 2016. Use of digestate from a decentralized on-farm biogas plant as fertilizer in soils: An ecotoxicological study for future indicators in risk and life cycle assessment. *Waste Management* 49, 378–389. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.12.009>

*SFS-ISO 21338 Veden laatu.* Kineettinen määrittäminen sedimentin, muiden kiinteiden aineiden ja värillisten näytteiden estovaikutuksesta *Vibrio fischeri* valonlähdevalotukseen (kineettinen valobakteeritesti). Suomen Standardoimisliitto SFS ry.

# BIOKAASULAITOSTEN RISKIENHALLINTAA KEHITTÄMÄSSÄ

Salla Pulliainen & Hanne Soininen & Kai Sormunen  
& Jade Skog

BioCir-hankkeessa kehitettiin biokaasulaitosten riskienhallintaa ja oma-valvontaa. Toimenpiteessä kartoitettiin alueen biokaasulaitosten tarpeita uuden tiedon tuottamiselle ja omavalvontasuunnitelmien kehittämiseksi sekä pyrittiin kehittämään biokaasulaitosten varautumista häiriötilanteisiin. Riskien kartoittamisen tueksi työssä tehtiin laitosvierailu BioCir-hankkeessa mukana olevalle täyden mittakaavan biokaasulaitokselle. Riskejä tarkasteltiin riskimatriisin avulla, jossa käsiteltiin biokaasulaitokseen liittyviä riskejä sekä niiden todennäköisyyksiä ja vaikutusten suuruuksia riskin toteutuessa. Lisäksi matriisissa esitettiin hallintakeinoja riskien välttämiseksi ja vaikutusten pienentämiseksi. Tässä artikkelissa tunnistettuja riskejä ja niiden hallintaa käsitellään yleisellä tasolla. Selvityksen tulokset ovat käytettävissä sisällytettäväksi biokaasulaitosten toimintaan, omavalvontasuunnitelmien ja laitosten riskienarvioinnin kehittämiseen sekä kriittisten valvontapisteiden tarkentamiseen.

## Biokaasun koostumus

Biokaasun koostumus vaihtelee riippuen erityisesti prosessissa käytettävistä syötteistä. Kaasun pääkomponentit ovat kuitenkin aina samat: metaani ja hiilidioksidi. Alla olevassa taulukossa 1 on esitetty raakabiokaasun tyypillinen koostumus.

**TAULUKKO 1.** Raakabiokaasun tyypillinen koostumus (Skog & Sormunen 2023).

Yhdiste	Määrä (%)
Metaani (CH <sub>4</sub> )	55–75
Hiilidioksidi (CO <sub>2</sub> )	25–45
Typpi (N <sub>2</sub> )	0–3
Rikkivety (H <sub>2</sub> S)	0–0,5
Muita yhdisteitä happi (O <sub>2</sub> ), vety (H <sub>2</sub> ), siloksaanit	<1

Metaani on hajuton ja väritön, ilmaa kevyempi kaasu, joka on syttyvää ja palavaa. Palo- ja räjähdysvaaran lisäksi suuri metaanivuoto sisätilaan saattaa aiheuttaa hapenpuutetta, mikäli ilma ei pääse vaihtumaan. Biokaasussa pieninä pitoisuuksina esiintyvä rikkivety on vaarallinen soluhengitysmyrkky, jonka hajukynnys on 0,008 ppm. Haju varoittaa terveysvaarasta, mutta rikkivety lamaannuttaa hajuainin 100–150 ppm:n (140–210 mg/m<sup>3</sup>) pitoisuudessa.

Hiilidioksidin vaarallisuus perustuu sen kykyyn syrjäyttää happea. Terveysvaikutukset riippuvat hiilidioksidin pitoisuudesta tilassa. Yli kahden prosentin hiilidioksidipitoisuudet kiihdyttävät hengitystä ja aiheuttavat päänsärkyä. Yli kymmenen prosentin pitoisuudet aiheuttavat hengenahdistusta, kovaa päänsärkyä, pahoinvointia ja tajuttomuuden noin 15 minuutin kuluessa. Erittäin suurina pitoisuuksina hiilidioksidi voi aiheuttaa hapenpuutteesta johtuvan välittömän tukehtumisen suljetussa tilassa.

Biokaasun tuotantojärjestelmässä käytettävistä materiaaleista säädetään tietyiltä osin kemikaali- ja maakaasulainsäädännössä. Kaikkien biokaasun kanssa kosketuksissa olevien materiaalien ja laitteistojen tulee olla biokaasulle soveltuvia. Suomessa ulkoasennuksissa ja lämmittämissä tiloissa tulee käyttää materiaaleja, jotka kestävät pakkasta -40 °C:seen asti.

## Biokaasulaitoksen omavalvonta

Biokaasuprosessin kriittisillä valvontapisteillä tarkoitetaan prosessin niitä vaiheita, jotka ovat merkittävimpiä vaiheita vaarojen estämiselle, poistamiselle tai vähentämiselle. Laitokset määrittelevät kriittiset valvontapisteensä itse, mutta biokaasuprosessista ja sen vaatimuksista johtuen valvontapisteet ovat pääasiassa hyvin samoja eri laitosten välillä. Kriittisiä valvontapisteitä voivat olla esimerkiksi raaka-aineen vastaanotto, esikä-

sittely, hygienisointi ja mädätysprosessi. Laitokset käsittelevät kriittisiä valvontapisteitään sekä muita laitoksen toimintaan liittyviä toimintoja ja riskitekijöitä omavalvontasuunnitelmissaan. Omavalvontasuunnitelmissa tulee lisäksi olla suunnitelmat syötteiden ja lopputuotteiden laadunvalvonnasta sekä toimintaohjeet eri häiriötilanteiden varalle. Laitoksen toiminnasta pidetään kirjaa omavalvontasuunnitelman mukaisesti ja suunnitelmaa myös päivitetään tarvittaessa. Tässä artikkelissa tarkastellaan työturvallisuuteen, ympäristöriskeihin sekä sähkökatkoihin ja -vikoihin liittyviä riskejä.

## Työturvallisuusriskit

Ensimmäisenä tarkastelun kohteena olivat kemialliset vaaratekijät. Biokaasu aiheuttaa vaaraa päästessään hengitysilmaan, sillä biokaasun komponentit syrjäyttävät happea. Lisäksi esimerkiksi rikkivety on erittäin myrkyllinen kaasu, joka korkeina pitoisuuksina aiheuttaa hengenvaaran. Tietyt kaasut myös turruttavat hajuaistin hyvinkin matalissa pitoisuuksissa, joten kaasujen läsnäoloa ei aina pysty havaitsemaan aistinvaraisesti.

Biokaasulaitoksella työskentelevien henkilöiden tuleekin käyttää henkilökohtaisia kaasuhälyttimiä työskennellessään tiloissa, joissa kaasun muodostuminen tai sen kerääntyminen tiloihin on mahdollista. Myös tiloihin kiinteästi sijoitettavat hälyttimet turvaavat työntekijöitä, sillä tilassa sijaitseva hälytinturva voi ilmoittaa vaarasta jo ennen kuin työntekijä menee kyseiseen tilaan. Hälyttimien käytössä täytyy huomioida niiden ohjeen mukainen käyttö ja sijoittaminen sekä esimerkiksi huollon ja kalibroinnin oikea-aikainen toteuttaminen.

Biokaasuprosessiin käytettävät syötteet aiheuttavat biokaasulaitoksella biologisen vaaratekijän. Muun muassa hygienisoimaton jätevesiliete tai lietelanta sisältävät taudinaiheuttajia, jotka voivat aiheuttaa kontaminaatiota. Biologisilta riskeiltä suojaudutaan noudattamalla hygieenisiiä tapoja sekä käyttämällä tarvittavia suojavaatteita ja hengityssuojaimia.

Työturvallisuusriskejä aiheuttaa lisäksi myös muun muassa putoamisvaara esimerkiksi portaissa liikkuessa tai avonaisten raaka-aine- tai mädähteiden välittömässä läheisyydessä työskentely. Portaiden tulee olla rakennusmääräysten mukaiset, ja esimerkiksi käytössä olevien tikkaiden tulee olla käyttötarkoitukseensa hyväksytyt. Avonaisten raaka-ainealtaiden, sillojen ja esimerkiksi niiden syöttöaukkojen aiheuttamaa putoamisriskiä voidaan vähentää käyttämällä kansia tai ritilöitä, jotka estävät putoamisen.

Biokaasulaitoksella voi tapahtua putki- ja venttiilirikkojen yhteydessä paineellisten kaasujen äkillistä purkautumista. Riskiä esiintyy erityisesti tilanteissa, joissa oleskellaan kaasun siirtolinjojen välittömässä läheisyydessä. Riskiin voidaan varautua asianmukaisilla kaasulinjaston sulkuventtiileillä sekä yli- ja alipainehälyttimillä. Kaasun purkautuminen voi aiheuttaa myös räjähdys- tai tulipaloriskin, mikäli läsnä on joku kaasun sytyttävä syttymislähde. Kyseisiin tilanteisiin varautumista varten biokaasulaitoksella tulee olla ajantasainen, kaikkien työntekijöiden tiedossa oleva pelastussuunnitelma, jonka mukaan kyseisiä riskejä ja niiden toimintatapoja on käyty läpi etukäteen. Häätötilanteissa tulee muistaa, että ensisijainen toimi on soittaa hätäkeskukseen, jolloin paikalle saadaan pelastusalan ammattilaiset.

Työturvallisuusriskien ennakoinnissa työntekijöiden omalla toiminnalla on merkittävä vaikutus riskien toteutumiseen. Työntekijöiden huolellisuus, turvallisten työtapojen noudattaminen ja epäkohtiin puuttuminen lisäävät sekä työntekijöiden että työympäristön turvallisuutta. Työturvallisuuteen liittyviä haitta- ja vaaratekijöitä ja niihin liittyviä vaaratekijöitä on esitetty taulukossa 2.

**TAULUKKO 2.** Työturvallisuusriskit ja niiden hallintakeinot (Skog & Sormunen 2023).

Haitta- ja vaaratekijät	Millaisia vaaratekijöitä	Riskinhallintakeinot
Kemialliset vaaratekijät, haitalliset kaasut hengitysilmassa	Biokaasu syrjäyttää happea > hengitysvaikeudet, syttymisvaara 5–15 %:n metaanipitoisuudessa	Henkilökohtaiset ja kiinteät kaasuhälyttimet, raitisilmapuhallin laitetilassa
Biologiset vaaratekijät	Altistuminen taudinaiheuttajille	Työtavat, suojavaatetus, hengityssuojaimet
Putoamisvaara portaissa tai esim. raaka-aine- tai mädäntealutisiin	Loukkaantumisvaara, altistuminen taudinaiheuttajille ja kaasuille	Putoamisesteet ja turvatikkaat altaisiin, kannet tarvittavissa paikoissa
Paineellisen kaasun äkillinen purkautuminen	Putki- tai venttiilirikon yhteydessä kaasujen äkillistä purkautumista	Sulku- ja varoventtiilit kaasulinjastossa, yli- ja alipainehälytykset
Räjähdys tai tulipalo	5–15 %:n pitoisuuden omaava metaaniseos voi syttymislähteen läsnä ollessa leimahtaa ja jäädä palamaan purkukohdassa	Varoventtiilien kautta hallittu kaasun purku, sulkuventtiilit käytettävissä, pelastussuunnitelman ajantasaisuus

## Ympäristöriskit

Biokaasulaitoksen ympäristöriskeihin kuuluvat muun muassa biokaasun, sen raaka-aineiden sekä prosessista saatavan mädätteen mahdollinen pääsy ympäristöön. Biokaasun sisältämä metaani on kasvihuonekaasu eli yksi ilmaston lämpenemistä edistävästä kaasusta. Kaasua voi purkautua laitokselta ilmakehään häiriötilanteen tai onnettomuuden yhteydessä, mutta myös satunnaisesti varoventtiilien kautta. Häiriötilanteen vakavuudesta ja seurauksista riippuen on mahdollista, että biokaasureaktorin toimintaa täytyy väliaikaisesti rajoittaa, kunnes häiriö on korjattu.

Mikäli biokaasulaitoksen reaktoriin tai putkistoihin tulisi esimerkiksi halkeama tai repeämä, voisi ravinnepitoinen mädäte vuotaa ympäristöön. Päästessään ympäristöön mädäte aiheuttaa ympäristökuormitusta, ja mikäli vaikutusalueella on pinta- tai pohjavesiä, myös vesistökuormitusta. Mikäli riski on olemassa reaktorin varoaltaista huolimatta, riskiin tulisi varautua selvittämällä etukäteen mädätteen mahdollinen valumissuunta sekä pintavesien laskusuunta. Lisäksi tulee arvioida, kuinka nopeasti mädäte mahdollisesti virtaisi ympäristössä. Haittojen suuruuteen vaikuttavat tapahtuneen vaurion laajuus sekä kohteen lähiympäristön ominaisuudet, kuten maaperän vedenläpäisykyky, pohjaveden pinnan korkeus, läheiset häiriintyvät kohteet sekä vesistöjen ominaispiirteet.

Kun mädätteen oletettu virtaussuunta on arvioitu, voidaan ympäristön ominaisuuksista riippuen mädätteen virtausreitille suunnitella esimerkiksi rakenteita, joiden avulla mädätevirran kulkua saataisiin hidastettua tai kokonaan estettyä. Vuodon varalle tulisi tehdä etukäteen toimintasuunnitelma, jossa otetaan huomioon toimintaohjeet vuodon ehkäisemiseksi, vuoto-onnettomuuden ajalle sekä vuodon jälkeiselle laitoksen korjaukselle. Lisäksi ympäristön tilan ennallistamiseen tulee kiinnittää huomiota. Esimerkiksi pinta- ja pohjavesiin liittyen olisi hyvä olla suunnitelma, kuinka mahdollisten vuotojen aiheuttamia vaikutuksia seurataan ja vähennetään.

Biokaasuprosessiin syötetyt raaka-aineet voivat ominaisuuksiensa perusteella aiheuttaa reaktoriin ylikuormitustilan, jolloin reaktorin pH-laskee ja reaktori menee niin sanotusti hapoille. Tällöin biokaasun metaanipitoisuus laskee alle hyödyntämisrajan ja kaasua on johdettava ilmakehään. Biokaasuprosessin parametrejä ja kuormitustilaa onkin seurattava säännöllisesti tällaisten tilanteiden välttämiseksi ja ylikuormitustilaan tulee reagoida välittömästi.



Kun biokaasuprosessissa syntyvää mädätettä käytetään lannoitteena, tulee sen täyttää tietyt lainsäädännön velvoittamat laatuvaatimukset eikä mädäte esimerkiksi saa sisältää salmonellaa. Mikäli salmonellaa kuitenkin todetaan mädätteestä otetussa näytteessä, mädätteen hygieenisointiprosessi on jostain syystä pettänyt. Tämä aiheuttaa altistumista taudinaiheuttajille, eikä materiaalivirtoja voida hyödyntää niiden normaaliin käyttötarkoitukseen. Salmonellaan liittyvät toimet ja niihin varautuminen tulee huomioida jo laitoksen omavalvontasuunnitelmassa. Ympäristöriskien haitta- ja vaaratekijät ja niihin liittyvät riskinhallintakeinot on koottu taulukkoon 3.

**TAULUKKO 3.** Ympäristöriskit ja niiden hallintakeinot (Skog & Sormunen 2023).

Haitta- ja vaaratekijät	Millaisia vaaratekijöitä	Riskinhallintakeinot
Kaasuvuodon ilmasto-haitat	Metaani on haitallinen kasvihuonekaasu, edistää ilmaston lämpenemistä	Jätteiden syötön lopetus manuaalisesti häiriötilanteissa
Mädätteen vuoto reaktoreista tai putkistoista	Ravinnepitöisen mädätteen purkautuminen ympäristöön ja/tai pohjaveteen	Vuodon leviämisen arviointi, varautuminen, ympäristön tilan seuranta ja ennallistamissuunnitelma
Reaktorin ylikuormittunen	Reaktori menee ns. hapoille > tuotetun biokaasun metaanipitoisuus laskee alle hyödyntämisrajan > johdettava ilmakehään	Reaktorin kuormituksen seuranta näytteenotoin ja prosessimittauksin
Salmonellan esiintymisen mädätteessä	Taudinaiheuttajille altistuminen ja materiaalivirtojen esiintyminen, materiaalien ohjaaminen muualle käsittelyyn	Huomioitu omavalvontasuunnitelmassa

## Sähkökatkot ja -viat ja tulipalot

Biokaasulaitosten varautumisesta huolimatta on olemassa riski laitosta koskeville sähkökatkoksille ja sähkölaitteiden vioille. Sähkölaitteissa esiintyvät viat tai esimerkiksi ylikuumentuminen voivat aiheuttaa laitteistossa tai laiteteiloissa tulipalon. Sähkökatkojen tai -vikojen yhteydessä kaasut voivat purkautua hallitsemattomasti tai prosessi voi muuten häiriintyä. Laitoksella muodostuvat ja mahdollisesti varastoitavat kaasut ovat helposti syttyviä, ja tulipalon yhteydessä onkin aina riski myös räjähdykselle tai kaasujen leimahtamiselle.

Koska biokaasuprosessi perustuu mikrobien toimintaan, kaasua muodostuu sähkökatkosta huolimatta. Tällöin muodostuvat kaasut purkautuvat varoventtiilien kautta, mutta laitoksella tulisi kuitenkin myös olla tarvittavat varavoimakoneet käytössä suurempien vahinkojen estämiseksi. Häiriötilanteessa kaasua voi kertyä myös mädätteeseen, jolloin mädäte voi turvota kaasulinjoihin ja aiheuttaa siten tukoksia tai muita ongelmia prosessissa. Kaikki sähkölaitteet tulisi tarkistaa ja huoltaa säännöllisesti ja laitteissa tulisi tarvittaessa olla hätäpainikkeet häiriötilanteiden varalle. Sähkökatkosiin ja -vikoihin liittyvät haitta- ja vaaratekijät sekä niihin liittyvät riskinhallintakeinot on koottu taulukkoon 4.

**TAULUKKO 4.** Sähkökatkoihin ja -vikoihin liittyvät riskit ja niiden hallintakeinot (Skog & Sormunen 2023).

Haitta- ja vaaratekijät	Millaisia vaaratekijöitä	Riskinhallintakeinot
Sähkölaitteen tai laite-tilan tulipalo	Kaasujen purkautuminen varoventtiilien kautta räjähdys- tai leimahtamisvaara	Hätä seis -kytkimet, säännöllinen laitteiden tarkistus ja huolto
Sähkökatkon aikaan kaasuntuotanto jatkuu	Kaasut purkaantuvat varoventtiilien kautta, vaara-alueet varoventtiilien läheisyydessä	Varavoimakone käytävissä, säännöllinen huolto ja testaus
Kaasua kertyy mädätteeseen sekoittumisen estyessä	Mädätteeseen kertyy biokaasua, ja mädäte voi "turvota" kaasutilaan ja -linjoihin > voi seurata laiterikkoja ja kaasujen hallitsematonta purkautumista	Varavoimakone käytävissä, säännöllinen huolto ja testaus

## Riskien ennakointi luo turvalliset puitteet työntekijöille ja laitoksen toiminnalle

Biokaasuprosessin ja siitä muodostuvien kaasujen hallintaan liittyy aina laadultaan ja voimakkuudeltaan erilaisia riskejä. Vaikka riskit olisi kartoitettu etukäteen ja niihin olisi varauduttu parhaalla mahdollisella tasolla, ei kaikkia häiriötilanteita pystytä etukäteen ennakoimaan. Useimmiten riskien varoalueet ovat biokaasulaitoksen välittömässä läheisyydessä, mutta riskiä kohdistuu myös laitoksen ympäristöön. Mitä paremmin prosessi, laitos ja sen osat tunnetaan, sitä paremmin riskeihin kuitenkin pystytään varautumaan. Riskimatriisitarkastelulla voidaan tunnistaa haitta- ja vaaratekijät sekä arvioida riskin todennäköisyyttä, vaikutuksia ja riskin suuruutta. Yleisellä tasolla riskimatriisit ovat sovellettavissa kaikille biokaasulaitoksille, mutta laitoksilla on myös omia ominaispiirteitään, jotka tulee ottaa huomioon riskien kartoituksen yhteydessä.

# LÄHTEET

*Skog, J. & Sormunen, K.* 2023. Biokaasulaitoksen prosessin riskien ennakointi ja omavalvonnan kehittäminen. Ramboll Finland Oy. Raportti.





XAMK  
KEHITTÄÄ