



Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 92/2023

# Kohti kiertotaloutta jäte- ja sivuvirtoja hyödyntämällä

Saija Rasi, Markku Vainio, Ilmari Laaksonen, Nora Pap,  
Maryam Ghalibaf, Niina Honkala, Erika Winqvist,  
Siiri Perämäki, Joni Niskanen ja Sylva Larsson

Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 92/2023

# **Kohti kiertotaloutta jäte- ja sivuvirtoja hyödyntämällä**

**Saija Rasi, Markku Vainio, Ilmari Laaksonen, Nora Pap, Maryam Ghalibaf, Niina Honkala, Erika Winqvist, Siiri Perämäki, Joni Niskanen ja Sylva Larsson**



Vipuvoimaa  
EU:lta  
2014–2020



KESKI-SUOMEN LIITTO



JYVÄSKYLÄ



MUSTANKORKEA



HSY



KUOPION  
ENERGIA

### Viittausohje:

Rasi, S., Vainio, M., Laaksonen, I., Pap, N., Ghalibaf, M., Honkala, N., Winqvist, E., Perämäki, S., Niskanen, J. & Larsson, S. 2023. Kohti kiertotaloutta jäte- ja sivuvirtoja hyödyntämällä. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 92/2023. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 40 s.

Saija Rasi ORCID ID, <https://orcid.org/0000-0002-4007-9783>

Tämä raportti on EU-osarahoitettujen Kiertotalouden ekosysteemi: jäte- ja sivuvirrat raaka-aineiksi (KIRE) -hankkeen tulosraportti.



ISBN 978-952-380-791-4 (Painettu)  
ISBN 978-952-380-792-1 (Verkkajulkaisu)  
ISSN 2342-7647 (Painettu)  
ISSN 2342-7639 (Verkkajulkaisu)  
URN <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-380-792-1>  
Copyright: Luonnonvarakeskus (Luke)

Kirjoittajat: Saija Rasi, Markku Vainio, Ilmari Laaksonen, Nora Pap, Maryam Ghalibaf, Niina Honkala, Erika Winqvist, Siiri Perämäki, Joni Niskanen ja Sylva Larsson

Julkaisija ja kustantaja: Luonnonvarakeskus (Luke), Helsinki 2023

Julkaisu vuosi: 2023

Kannen kuva: Joni Niskanen

Painopaikka ja julkaisumyynti: PunaMusta Oy, <http://luke.omapumu.com/fi>

## Tiivistelmä

Saija Rasi<sup>1</sup>, Markku Vainio<sup>2</sup>, Ilmari Laaksonen<sup>2</sup>, Nora Pap<sup>2</sup>, Maryam Ghalibaf<sup>2</sup>, Niina Honkala<sup>2</sup>, Erika Winquist<sup>2</sup>, Siiri Perämäki<sup>4</sup>, Joni Niskanen<sup>4</sup> ja Sylva Larsson<sup>4</sup>

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

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

<sup>3</sup>Luonnonvarakeskus (Luke), Helsinki

<sup>4</sup>Jyväskylän yliopisto

Kiertotalouden ekosysteemi: jäte- ja sivuvirrat raaka-aineiksi (KIRE) -hanke on Euroopan aluekehitysrahaston Keski-Suomen liiton kautta rahoittama hanke, joka toteutettiin 1.4.2021–31.8.2023. Hankkeen toteuttivat Jyväskylän yliopiston kemian laitos sekä Luonnonvarakeskus. Hanketta rahoittivat myös Jyväskylän kaupunki, Mustankorkea Oy, Helsingin seudun ympäristöpalvelut, Saarijärven Kaukolämpö Oy ja Kuopion Energia Oy.

Tässä raportissa kuvataan hankkeen toimenpiteitä, joiden tavoitteena oli kehittää Keski-Suomeen ainutlaatuinen kierrätys ekosysteemi hyödyntämällä paikallisia jäte- ja sivuvirtoja raaka-aineiden tuottamiseksi. Hankkeessa yhdistettiin anaerobinen ja hydrometallurginen prosessi tuottamaan biokaasua, orgaanisia happoja, mädätysjäännöstä ja metalliseoksia. Hankkeen prosesseja kehitettiin sekä laboratoriomittakaavassa että pilot-laitteistoilla Jyväskylässä ja Jokioisilla.

Yhdyskunnista erilliskerättyä biojätettä käsiteltiin anaerobisella eli mädätysprosessilla tuottamaan biokaasun lisäksi orgaanisia happoja. Lisäksi selvitettiin mahdollisuutta hyödyntää voimalaitostuhkaa mädätysprosessissa happamuuden säätöön. Tuhkalisäyksen vaikutusta prosessiin selvitettiin sekä mädätysprosessin tehostamisen että jäljelle jäävän mädätysjäännöksen lannoitevaikutusten kannalta. Mädätysprosessista saatua orgaanista happojaetta käytettiin kestopagneettien metallien talteenottamiseksi puhdistus- ja konsentroituvaiheiden jälkeen. Tuotteina saatiin harvinaisten maametallien seos sekä rautasaostuma.

Hankkeen tuloksena todetaan, että biojätteen käsittelystä voidaan tuottaa metallien talteenottoon tarvittavia orgaanisia happoja. Myös tuhkan käytössä prosessointien eri vaiheissa havaittiin positiivisia vaikutuksia mm. happojen tuottoon sekä mädätysjäännöksen hyödyntämiseen. Hankkeessa tehtiin lisäksi kannattavuustarkastelu orgaanisten happojen tuottamiselle, johon liittyy kuitenkin vielä epävarmuuksia mm. valitun laitostyyppin ja hapon puhdistuksen osalta. Eri prosessivaiheiden optimoinnilla voitaisiin kuitenkin päästä lopputulokseen, jossa kierrätys ekosysteemin tuotteilla voidaan korvata fossiilisia sekä harvinaisia raaka-aineita.

**Asiasanat:** Kiertotalous, jäte, biojäte, voimalaitostuhka, kestopagneetit, orgaaniset hapot, metallien talteenotto, harvinaiset maametallit, mädätysjäännös, lannoitevaikutus

## Abstract

Saija Rasi<sup>1</sup>, Markku Vainio<sup>2</sup>, Ilmari Laaksonen<sup>2</sup>, Nora Pap<sup>2</sup>, Maryam Ghalibaf<sup>2</sup>, Niina Honkala<sup>2</sup>, Erika Winqvist<sup>2</sup>, Siiri Perämäki<sup>4</sup>, Joni Niskanen<sup>4</sup> and Sylva Larsson<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Natural Resources Institute Finland (Luke), Jyväskylä

<sup>2</sup>Natural Resources Institute Finland (Luke), Jokioinen

<sup>3</sup>Natural Resources Institute Finland (Luke), Helsinki

<sup>4</sup>University of Jyväskylä

Circular economy ecosystem: raw materials from waste and side streams (KIRE) project (1.4.2021–31.8.2023) was financed by the European Regional Development Fund through Regional council of Central Finland. Other financiers of the project are the City of Jyväskylä, Mustankorkea LTD, Helsinki Region Environmental Services, Saarijärven Kaukolämpö LTD, and Kuopion Energia LTD. Project was carried out by the Department of Chemistry at University of Jyväskylä and the Natural Resources Institute Finland.

This report describes the project's measures, the goal of which was to develop a unique circular economy ecosystem in Central Finland by utilizing local waste and side streams to produce raw materials. The project combined an anaerobic and hydro-metallurgical processes to produce biogas, organic acids, digestate and metal products. The project's processes were developed both on a laboratory scale and with pilot equipment in Jyväskylä and Jokioinen.

Separately collected municipal biowaste was treated with an anaerobic, i.e., digestion process to produce organic acids in addition to biogas. In addition, the possibility of using power plant ash in the digestion process to adjust acidity was investigated. The effect of ash addition on the process was investigated both in terms of enhancing the digestion process and the fertilizer effects of the remaining digestate. The organic acid fraction obtained from the digestion process was used to recover the metals of the permanent magnets after the purification and concentration steps. The products were a mixture of rare earth metals and an iron precipitate.

As a result of the project, it is stated that the organic acids needed for the recovery of metals can be produced from the processing of biowaste. Positive effects were also observed in the use of ash in different stages of processing, e.g. for the production of acids and utilization of the digestion residue. In addition, the project carried out a profitability analysis for the production of organic acids, which, however, still involves uncertainties, e.g. for the selected plant type and acid purification. However, by optimizing the different process steps, the end result could be reached, where fossil and rare raw materials can be replaced with circular economy products.

**Keywords:** Circular economy, waste, biowaste, power plant ash, waste magnets, organic acids, hydrometallurgical process, rare earth metals, digestate, fertilizer

# Sisällys

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. Johdanto .....</b>  | <b>6</b>  |
| <b>2. Kiertotalouskonseptin prosessit ja tuotteet .....</b>   | <b>7</b>  |
| 2.1. Orgaanisten happojen tuottaminen.....  | 8         |
| 2.2. Hydrometallurginen prosessi.....   | 8         |
| 2.3. Määdetejäännöksen ja tuhkan käyttö lannoitteena .....  | 9         |
| <b>3. Kiertotalouskonseptin erillisprosessien tulokset .....</b>  | <b>10</b> |
| 3.1. Orgaanisten happojen tuottaminen biojätteestä.....   | 10        |
| 3.2. Nesteiden puhdistus ja konsentrointi.....  | 12        |
| 3.2.1. Kalvosuodatus .....  | 12        |
| 3.2.2. Saostus ja haihdutus.....  | 12        |
| 3.3. Biokaasuprosessi.....  | 13        |
| 3.4. Vedyn metanointi .....   | 14        |
| 3.5. Mädätysjäännöksen ja tuhkan hyödyntäminen.....   | 14        |
| 3.5.1. Yhteismädätteen kasvatuskokeet .....   | 14        |
| 3.5.2. Mekaanisen seoksen kasvatuskokeet .....  | 16        |
| 3.5.3. Yhteismädätteen ja mekaanisen seoksen käyttö lannoitevalmisteena tai<br>maanparannusaineena..... | 18        |
| 3.6. Harvinaisten maametallien talteenotto.....   | 18        |
| 3.6.1. Magneettien liuotus.....   | 18        |
| 3.6.2. Raudan erotus .....  | 20        |
| 3.6.3. Harvinaisten maametallien erotus.....  | 20        |
| 3.6.4. Pilot-kokeet.....  | 21        |
| <b>4. Malliprosessin kannattavuus .....</b>   | <b>22</b> |
| 4.1. Malliprosessi.....   | 22        |
| 4.2. Happotuotannon kannattavuus verrattuna biokaasuprosessiin .....                                    | 23        |
| <b>5. Yhteenveto.....</b>   | <b>26</b> |
| <b>Viitteet.....</b>  | <b>27</b> |
| <b>Liitteet .....</b>   | <b>29</b> |

# 1. Johdanto

Yhteiskuntamme tämän hetken suurimmiksi haasteiksi voidaan lukea ilmastonmuutos ja luonnon monimuotoisuuden väheneminen. Luonnonvarojen kestävä käyttö yhdistettynä väestönkasvuun aiheuttaa maapallon kestokyvylle huomattavia haasteita. Tarvittava siirtymä hiilineutraaliin yhteiskuntaan vaatiikin yhä enemmän tehokkaita ja innovatiivisia energiaratkaisuja vähentämään fossiilisten polttoaineiden käyttöä. Lisäksi teollisuuden ja yhteiskunnan tarvitsemien raaka-aineiden saatavuus ja huoltovarmuus on noussut entistä tärkeämmäksi koronakriisin jälkeen.

Euroopan komissio on määritellyt useita EU:n kannalta kriittisiä raaka-aineita (European Commission 2010). Erityisen haastava tilanne on harvinaisten maametallien osalta, joiden tuotantoa ei ole EU:ssa lainkaan. Harvinaisia maametalleja tarvitaan tulevaisuuden puhtaissa ratkaisuissa, kuten tuulivoimaloiden magneeteissa ja sähköautojen moottoreissa. On arvioitu, että jopa puolet harvinaisten maametallien tarpeesta voidaan korvata EU:n sisäisillä sekundäärisillä lähteillä (Ciancci et al. 2019). Metallien talteenotto sekundäärisistä lähteistä on myös ympäristövaikutusten kannalta välttämätön kehityssuunta: talteen otetun metallin kasvihuonekaasupäästöjen on arvioitu olevan vain kymmenesosan verrattuna neitseellisiin lähteisiin. Harvinaisten maametallien osalta yksi rikkaimmista jättemateriaaleista on neodyymimagneetit, joiden massasta noin kolmannes on harvinaisia maametalleja. Ottamalla metallit talteen neodyymimagneeteista voidaan säästää neitseellisiä luonnonvaroja sekä vähentää kasvihuonekaasupäästöjä.

Kiinnostus fossiilisten polttoaineiden ja materiaalien korvaamiseen biopohjaisilla tuotteilla on kasvanut viime vuosina. Suomessa erilliskerätyn biojätteen käsittely biokaasulaitoksissa on yleistynyt merkittävästi, mutta tuotteiden hyödyntämisessä on vielä parannettavaa. Esimerkiksi vuonna 2022 kaikesta Suomessa tuotetusta biokaasusta 11 % meni soih tupolttoon ja edelleen jäännökseen jäävät ravinteet ovat alihyödynnettyjä. Yksi keino tehostaa biokaasuprosessia on muuttaa prosessi kaksivaiheiseksi, jolloin prosessissa voidaan metaanin ja ravinteiden ohella tuottaa myös kemianteollisuudelle tärkeitä biotuotteita: orgaanisia happoja.

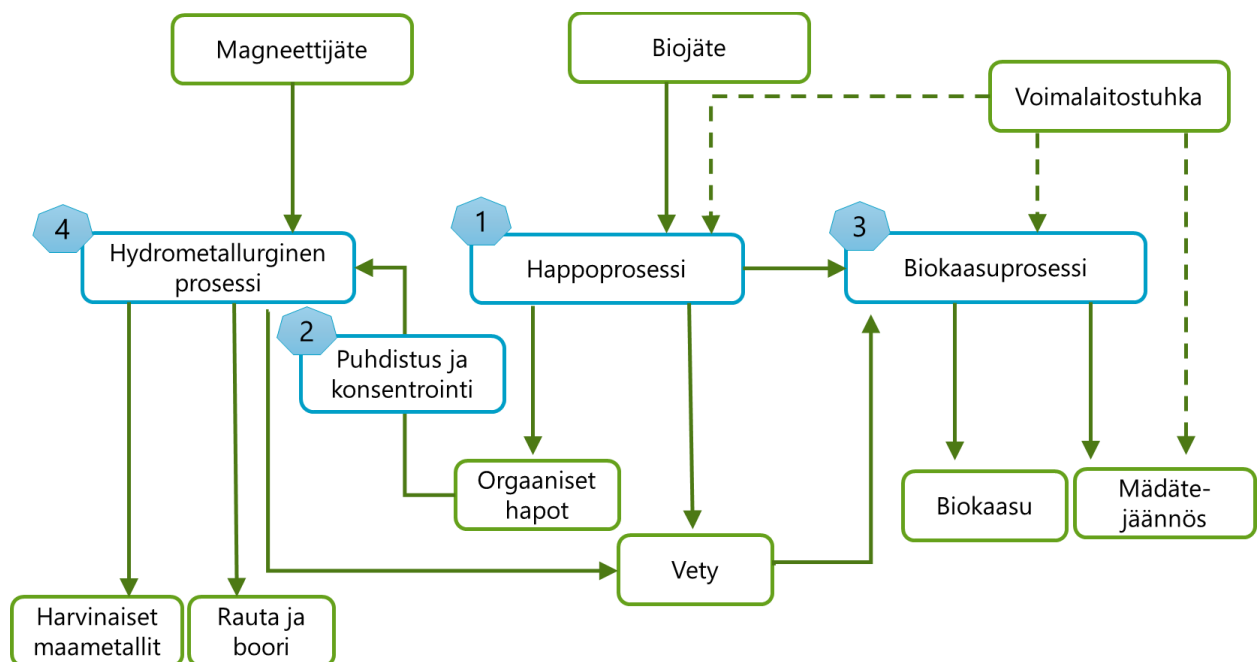
Suomalaisilla voimalaitoksilla syntyy vuosittain satoja tuhansia tonneja tuhkaa, jonka hyötykäytölle etsitään jatkuvasti uusia tapoja. Tuhka sisältää runsaasti kalsiumia, fosforia ja useita kasvien tarvitsemia hivenaineita, ja yhdistämällä tuhka anaerobisesta prosessista saatavaan tyypeä sisältävään jäännökseen, voidaan valmistaa kierrätyslannoitevalmisteita.

Kiertotalouden ekosysteemi: jäte- ja sivuvirrat raaka-aineiksi (KIRE) -hankkeen tavoitteena oli hyödyntää yllä mainittuja yhteiskunnassa muodostuvia jäte- ja sivuvirtoja uusien raaka-aineiden valmistamiseksi. Hankkeessa kehitettiin ainutlaatuinen konsepti kiertotalouden ekosysteemistä, jossa anaerobinen ja hydrometallurginen prosessi yhdistetään tuottamaan tehokkaasti energiaa, orgaanisia happoja, lannoitetta ja harvinaisia maametalleja paikallisista jätte- ja sivuvirroista.

## 2. Kiertotalouskonseptin prosessit ja tuotteet

Tässä hankkeessa kehitetty kiertotalouskonsepti perustuu useaan erilliseen prosessiin, jotka hyödyntävät toisista prosesseista muodostuneita sivujakeita (Kuva 1):

1. Anaerobinen happoprosessi
  - Biojätteen käsittely
  - Tuhkan hyödyntäminen prosessissa
2. Tuotettujen happojen puhdistus- ja konsentrointi
  - Syntyneen nestejakeen hyödyntäminen biokaasuprosessissa
3. Anaerobinen biokaasuprosessi
  - Happoprosessin jäännöksen käsittely
  - Vedyn hyödyntäminen in situ -metanoinnin avulla
  - Mädätteen hyödyntäminen kierrätyslannoitetuotteena
  - Tuhkan hyödyntäminen prosessissa ja/tai lannoitteena
4. Hydrometallurginen prosessi
  - Harvinaisten maametallien talteenotto



**Kuva 1.** Kiertotalouskonsepti erilaisille yhdyskuntajätejakeille.



## 2.1. Orgaanisten happojen tuottaminen

Anaerobinen biokaasuprosessi on yleisesti käytössä oleva yhdyskuntien ja teollisuuden orgaanisten jäte- ja sivuvirtojen hapeton käsittelymenetelmä. Biokaasuprosessissa orgaanisesta jätteestä muodostuu biokaasua ja mädätettä. Biokaasu sisältää pääosin hiilidioksidia ja metaania, mutta mukana on myös pieniä määriä vetyä, rikkivetyä, vesihöyryä ja ammoniakkaa (Rasi ym. 2007). Mädäte sisältää suurimman osan prosessissa käytetyn raaka-aineen sisältämistä ravinteista ja sitä voidaan käyttää lannoitteena sellaisenaan tai jatkojalostaa edelleen lannoitetuotteiksi (Tampio ym. 2018).

Biokaasua muodostuu usean eri hajoamisvaiheen kautta. Yhdessä hajoamisvaiheessa prosessissa syntyy lyhytketjuisia orgaanisia happoja. Tämä välivaihe mahdollistaa biokaasuteknologian käytön orgaanisten happojen valmistuksessa. Anaerobisella happoprosessilla tarkoitetaan sellaista prosessia, jossa biokaasuprosessin olosuhteita on muokattu niin, että metaania ei pääse muodostumaan. Tällaista prosessia kutsutaan myös happofermentoinniksi (Kleerebezem ym. 2015). Prosessin etuna verrattuna hapettamalla tai karboksyloimalla valmistettaviin happoihin on raaka-aineiksi soveltuvien materiaalien monipuolisuus ja se, että prosessi ei vaadi aseptisiä olosuhteita (Wainaina ym. 2019). Toisaalta happoprosessista jää edelleen hajoamatonta materiaalia, jota voidaan hyödyntää prosessin toisessa vaiheessa metaanintuotantoon. Happoprosessin sivutuotteena syntyy myös hiilidioksidin ja vedyn seoskaasua. Prosessissa voi syntyä lisäksi pieniä määriä metaania, riippuen prosessiolosuhteista. Vety ja metaani voidaan johtaa myös toiseen vaiheeseen, jolloin kaikki tuotettu energia tulee hyödynnettyä metaanina.

Anaerobisella happoprosessilla tuotettu neste on orgaanisten happojen ja veden seos, jossa voi mukana olla myös esimerkiksi alkoholeja sekä muita orgaanisia yhdisteitä. Seos tulee käsitellä jatkokäytön tarpeen mukaisesti. Tavoitteena voi olla happopitoisuuden nostaminen ja/tai nesteen puhdistaminen. Yleisiä puhdistus- ja konsentrintimenetelmiä ovat erilaiset suodatus- ja haihdutusprosessit. Tässä hankkeessa toteutetut happojentuotto, -puhdistus ja -konsentrinti, sekä sivutuotteiden käsittelyjen menetelmät on kuvattu Liitteessä 1.

## 2.2. Hydrometallurginen prosessi

Tässä projektissa kehitettiin hydrometallurgista prosessia käytettyjen neodyymimagneettien (NdFeB-magneettien) kierrättämiseksi. Hydrometallurgiassa materiaali useimmiten liuotetaan hyödyntämällä mineraalihappoja, kuten typpihappoa, jonka jälkeen halutut metallit eristetään saadusta liuoksesta esimerkiksi saostamalla. Materiaalin liuotuksessa voidaan hyödyntää myös ympäristöystävällisempiä orgaanisia happoja, joiden käyttöä selvitettiin tässä hankkeessa. Metallien liuotusprosessissa muodostuu lisäksi sivutuotteena vetyä, jota voidaan hyödyntää muissa prosessivaiheissa.

NdFeB-magneetit koostuvat raudan, neodyymin ja boorin muodostamasta metalliseoksesta. Seokseen lisätään tavallisesti myös muita metalleja parantamaan seoksen magneettisia ominaisuuksia. Seokseen tyypillisesti lisättyjä metalleja ovat alumiini, dysprosium, koboltti, praseodyymi ja terbium. Käyttökohteen mukaan magneetit voi olla myös tarpeen päällystää korroosiota paremmin kestäväällä metallikerroksella, kuten nikkelillä tai sinkillä. Valtaosa NdFeB-magneeteista on rautaa (n. 65 m-%) ja neodyymiä (n. 25 m-%), boorin ja muiden metallien osuuksien ollessa prosentin tai parin luokkaa. Tässä projektissa prosessin syötteenä käytettiin kierrätykseen päätyneiden tietokoneiden kiintolevyistä purettuja magneetteja.

Kehityshankkeen yhdeksi tavoitteista oli asetettu "harvinaisia maametalleja sisältävän tuotteen valmistus neodyymimagneeteista kierrätysjätteillä". Termi harvinaiset maametallit (eng. rare earth elements, REEs) viittaa tiettyyn planeettamme maaperässä pieninä pitoisuuksina esiintyvien arvokkaiden alkuaineiden joukkoon, johon edellä mainitut neodyymi, praseodyymi, dysprosium ja terbium muiden muassa kuuluvat. Projektin tavoitteena oli siis hyödyntää anaerobisessa prosessissa tuotettuja orgaanisia happoja käytettyjen neodyymimagneettien liuottamiseksi ja eristää harvinaiset maametallit hydrometallurgian keinoin. Tavoitteeksi asetettiin valmistaa harvinaisten maametallien oksidien ( $\text{REE}_2\text{O}_3$ ) seos, joka riittävän puhtaana olisi markkinointikelpoinen tuote. Laboratorio- ja pilot-kokeiden menetelmät on avattu Liitteessä 2.

### 2.3. Määdtejäännöksen ja tuhkan käyttö lannoitteena

Määdtejäännös on biokaasulaitosprosessin sivutuote. Se syntyy, kun orgaanista ainetta, kuten biojätettä, määdätetään hapettomissa oloissa. Määdtejäännöksen laatu ja koostumus riippuvat täysin käytetystä biokaasulaitoksen syötteestä eli määdätyksessä käytetystä orgaanisesta materiaalista.

Määdtejäännöstä käytetään yleisesti maanparannusaineena tai lannoitteena esimerkiksi pelloilla, koska se sisältää runsaasti kasveille välttämätöntä typpeä. Kuitenkin määdtejäännöksen turvallinen käyttö viljelyssä, jossa kasvatetaan ruokaa ihmisille, edellyttää tiettyjä määdätysolosuhteita tai hygienisointia. Hygienisointi voi tarkoittaa esimerkiksi tiettyä kompostointiaikaa tai määdätysprosessin lämpötilaa. Hygienisoinnin tarkoitus on eliminoida mahdollisia haitallisia mikrobeja määdtejäännöksestä (Kymäläinen & Pakarinen 2015). Lisäksi on olennaisen tärkeää tutkia käytön turvallisuutta erityisesti haitallisten raskasmetallien osalta. Suomessa lannoitteissa ja maanparannusaineissa haitallisia raskasmetalleja valvotaan Lannoitelaki 711/2022:n asettamissa puitteissa.

Tässä hankkeessa määdtejäännöksen ja tuhkan sekosta testattiin kasvatuskokeilla. Ensimmäisessä kokeessa testattiin määdtejäännöstä, johon oli jo biokaasuprosessin aikana sekoitettu tuhkaa. Tuhkaa lisättiin anaerobiseen prosessiin kolmessa eri pitoisuudessa happamuuden säätämiseksi. Jatkossa saadusta tuotteesta käytetään lyhennettä "yhteismäädäte". Lisäksi kasvatuskokeissa käytettiin vertailuryhmiä, joihin yhteismäädätettä verrattiin. Vertailuryhminä käytettiin esimerkiksi pelkkää määdätettä, johon ei ollut lisätty tuhkaa. Kaikki vertailuryhmät lisättiin ravinteiltaan köyhään kasvualustaan. Lisäksi kasvatuskokeissa tutkittiin pelkkää kasvualustaa vertailuna, jotta kasvualustan vaikutus kasvien kasvuun voitaisiin selvittää kokeissa. Kasvatuskokeessa selvitettiin, kuinka määdtejäännöksen lisääminen ravinnepöyhään kasvualustaan vaikuttaa valitun kasvin itävyyteen, biomassan määrään, kukintaan sekä metallien kertymiseen sinappikasveihin.

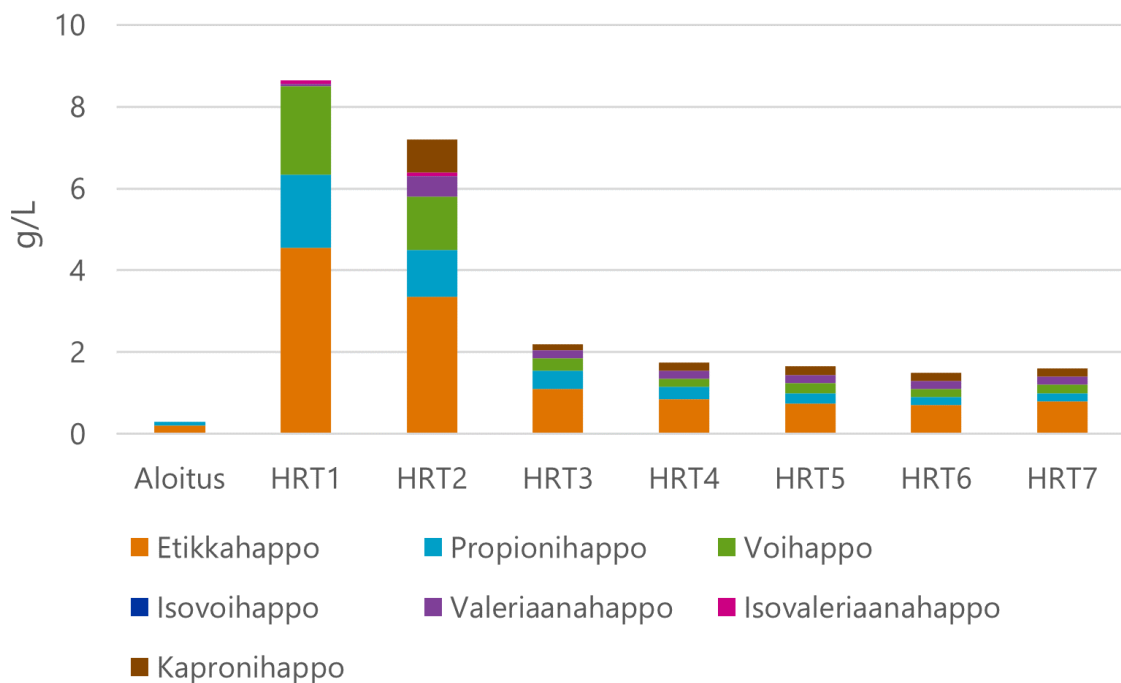
Toisessa kokeessa voimalaitostuhkaa ja kompostoitua määdtejäännöstä sekoitettiin toisiinsa, jonka jälkeen suoritettiin kasvatuskokeita seoksen lannoitevaikutusten tutkimiseksi. Saatua seosta nimitetään jatkossa lyhenteellä "mekaaninen seos". Kasvatuskokeiden menetelmät on kuvattu Liitteessä 3. Valittuna kasvina toimi keltasinappi, joka lyhennetään sinappina.

Ennen kasvatuskokeita käytetyt kasvualustat, yhteismäädätteet, mekaaninen seos sekä verrokkit analysoitiin kemiallisilla kokeilla. Kokeilla varmistettiin, että kasvualustoissa ei ole liikaa haitallisia raskasmetalleja ja että niissä on riittävästi ravinteita kasvien kasvuun. Tarkemmat tulokset ja käytetyt menetelmät löytyvät käyttökelpoisuusselvityksestä (Larsson 2023).

### 3. Kiertotalouskonseptin erillisprosessien tulokset

#### 3.1. Orgaanisten happojen tuottaminen biojätteestä

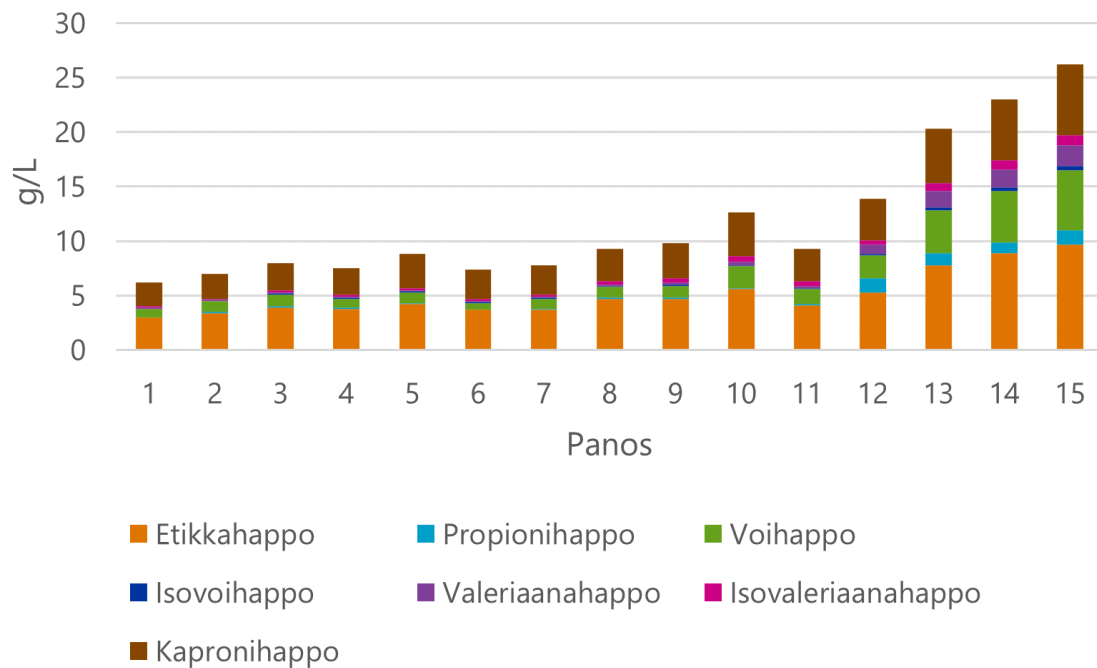
Orgaanisten happojen tuottamista testattiin kahdella eri reaktortyyppillä. Ensimmäisessä kokeessa (continuous stirred tank reactor, eli CSTR-reaktorit) metanogeenien de-aktivointi onnistui tehokkaasti, sillä metaaninmuodostus laski jo ensimmäisen viipymän puitteissa. Prosessin pH-pitoisuus kuitenkin laski liikaa, jonka vuoksi myös kuormitusta piti laskea merkittävästi ( $10 \text{ g}_{\text{orgaanista ainesta}} / \text{VS} / \text{l}_{\text{pv}} \rightarrow 2 \text{ g}_{\text{VS}} / \text{l}_{\text{pv}}$ ). Reaktoriin oli myös lisättävä enemmän vettä, jotta viipymä pysyi riittävän lyhyenä. Tämä taas aiheutti reaktorista poistettavan happopitoisen nesteen laimentumista. Tuloksena todettiin, että vaikka happojen muodostus onnistui, happopitoisuus tuotetussa nesteessä jäi liian alhaiseksi metallien erotusprosessia silmällä pitäen (Vainio & Rasi 2023) (Kuva 2).



**Kuva 2.** Happokonsentraatio CSTR kokeesta poistetusta mädätteestä.

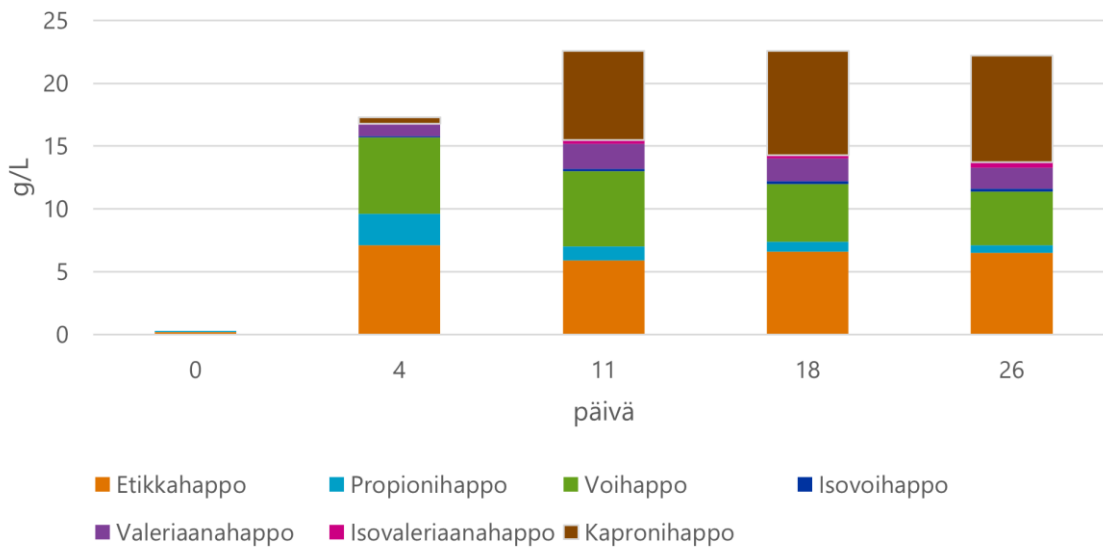
Suotopetireaktoria käytettäessä happokonsentraatiota pystyttiin nostamaan verrattuna CSTR-reaktoriin. Korkeampi happopitoisuus johti pH:n laskuun. Ilman tuhkan lisäystä pH pyrkikin laskemaan alle viiden, jonka on todettu heikentävän haihtuvia rasvahappoja muodostavien mikrobien toimintaa (Jiang ym. 2013).

Pienemmän tuhkamäärän lisäyksellä pH pysytteli yli viiden, mutta happonestettä kerättiin vielä viikoittain, jotta pH ei olisi laskenut liian alas. Suuremmalla tuhkalisäyksellä nestettä ei enää tarvinnut kerätä viikoittain, vaan happoja pystyttiin kerryttämään nesteeseen pidempään. Happojen konsentraatio kyettiin nostamaan huomattavasti korkeammaksi kuin ilman tuhkaa tai pienellä tuhkanlisäyksellä (Kuva 3). Suurempi määrä tuhkaa aiheutti kuitenkin pH:n nousun yli kuuden ja samalla metanogeenien aktivoitumisen, joka voi aiheuttaa happojen kulumista reaktorissa.



**Kuva 3.** Orgaanisten happojen konsentraatio suotopedistä poistettavassa nesteessä. Panokset ilman tuhkaa (1–4), tuhkanlisäys 0,1 g/gVS (5–10), tuhkanlisäys 0,5 g/gVS (11–15).

Pilot-mittakaavan suotopetikokeessa etikka- ja voihiappopitoisuudet nousivat merkittävästi ensimmäisten neljän päivän aikana, jonka jälkeen kapronihapon määrä kasvoi (Kuva 4). Kokonaishappomäärä oli korkeimmillaan 22,6 g/L.



**Kuva 4.** Happopitoisuudet pilot-kokeen eri päivinä (g/L).

## 3.2. Nesteiden puhdistus ja konsentroidi

### 3.2.1. Kalvosuodatus

Mikrosuodatuksen tavoitteena oli puhdistaa happoliuosta magneettien liuotusta varten. Tässä työssä käytettyjen kalvojen puhdistustehokkuutta arvioitiin permeaatin virtaaman avulla. Virtaaman pienenemisen avulla voitiin arvioida, että kalvojen pintaan kertyi sakkaa. Kalvojen puhdistus onnistui kuitenkin tehokkaasti, joten kalvot eivät tukkeutuneet lopullisesti, vaan niitä voitiin hyödyntää uudelleen puhdistamisen jälkeen. Mikrosuodatuksen avulla voitiin nesteitä puhdistaa tarvittavaan kirkkauteen, mutta hapot jakautuivat melko tasaisesti permeaattiin ja retentaattiin, eikä konsentroidia tapahtunut.

Mikrosuodatettujen nesteiden konsentroidiin käytettiin käänteisosmoosia. Käytetyt kalvot olivat selektiivisiä melkein kaikille yhdisteille, sillä vain pieni määrä etikkahappoa ja kapronihappoa havaittiin permeaatista suodatuksen jälkeen. Mitattujen happojen (etikka-, propioni-, voi-, isovoi-, valeriaana- isovaleriaana- ja kapronihappo) konsentroidi onnistui käänteisosmoosin avulla keskimäärin 1,5-kertaiseksi (Taulukko 1).

**Taulukko 1.** Happopitoisuudet ennen ja jälkeen käänteisosmoosiprosessin (g/L)

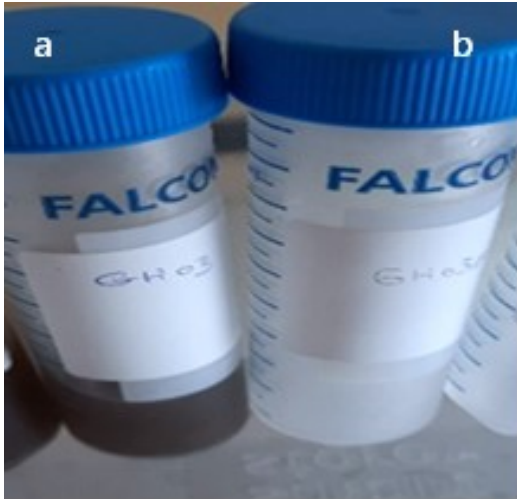
| -           | Etikka-happo | Propioni-happo | Voi-happo | Isovoi-happo | Valeriaana-happo | Isovaleriaana-happo | Kapronihappo |
|-------------|--------------|----------------|-----------|--------------|------------------|---------------------|--------------|
| Syöte       | 6,1          | 0,6            | 4,1       | 0,2          | 1,6              | 0,3                 | 7,9          |
| Permeaatti  | 0,5          | 0,0            | 0,2       | 0,0          | 0,1              | 0,0                 | 0,3          |
| Retentaatti | 9,9          | 1,0            | 6,7       | 0,3          | 2,6              | 0,6                 | 13,0         |

### 3.2.2. Saostus ja haihdutus

Yhdistetyllä saostus- ja haihdutusmenetelmällä happopitoisuuksia saatiin konsentroitua merkittävästi (Taulukko 2). Tuotettu happoseos oli myös hyvin kirkasta, joten prosessi toimi sekä konsentroidi- että puhdistusprosessina (Kuva 5). Massataselaskenta osoitti, että happoja saatiin talteen noin 80 % alkuperäisestä liuoksesta.

**Taulukko 2.** Happopitoisuudet ennen ja jälkeen prosessoinnin (g/L), a) kolmen näytteen keskiarvo pienessä mittakaavassa sekä b) käyttämällä uunia ensivaiheen haihdutukseen.

| a)      | Etikka-happo | Propioni-happo | Voi-happo | Isovoi-happo | Valeriaana-happo | Isovaleriaana-happo | Kapronihappo |
|---------|--------------|----------------|-----------|--------------|------------------|---------------------|--------------|
| Ennen   | 6,7          | 0,7            | 4,5       | 0,2          | 1,7              | 0,4                 | 8,8          |
| Jälkeen | 88,2         | 8,3            | 32,9      | 3,1          | 4,5              | 2,2                 | 6,8          |
| b)      |              |                |           |              |                  |                     |              |
| Ennen   | 6,5          | 0,6            | 4,3       | 0,2          | 1,7              | 0,4                 | 8,5          |
| Jälkeen | 162,4        | 12,5           | 48,7      | 4,6          | 6,2              | 2,8                 | 13,1         |

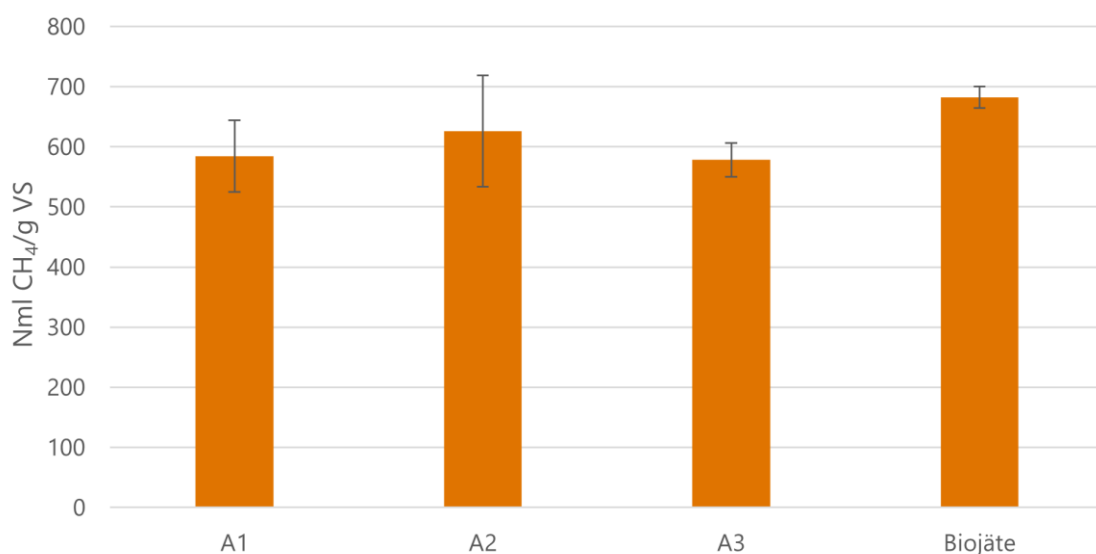


**Kuva 5.** Happoneste ennen (a) ja jälkeen (b) saostus-haihdutus-käsittelyn.

### 3.3. Biokaasuprosessi

Metaanintuottopotentiaali selvitettiin suotopetiprosessin jäännöksestä. Kokeiden perusteella fermentoinnin jälkeen biojätteessä on jäljellä vielä merkittävästi metaanipotentiaalia (Kuva 6). Koska tässä kokeessa käytettävän biojätteen metaanipotentiaali oli korkea, oli myös happoprosessin jäännösten metaanintuotto korkealla tasolla. Tuhkan lisääminen happoprosessiin vaikutti jäännöksen metaanintuottopotentiaaliin, mutta hajonta näytteiden välillä oli suurta. Siksi tämän kokeen perusteella ei voida tehdä johtopäätöksiä tuhkamäärän vaikutuksesta metaanintuottoon.

Happoprosessin jälkeen massan orgaanisen aineen pitoisuus oli noin 30 % vähemmän kuin käsittelemättömän biojätteen. Metaanin tuotto kuitenkin laski suhteessa vähemmän kuin orgaanista ainesta poistui. Happoprosessi toimi siis esikäsittelyä biokaasuprosessille aloittaen hitaasti hajoavien orgaanisten yhdisteiden hydrolyysin.



**Kuva 6.** Happoprosessien jälkeisten massojen sekä biojätteen metaanipotentiaalien keskiarvot. A1=massa ilman tuhkaa, A2=0,1 g/gVS tuhkaa, A3=0,5 g/gVS tuhkaa.

### 3.4. Vedyn metanointi

Sekä happoprosessista että metallinerotusprosessista syntyy vetyä. Koska kaikki sivutuotteet haluttiin tässä konseptissa hyödyntää, testattiin vedyn ja hiilidioksidin seoskaasun syöttämistä biokaasuprosessiin. Koska konsepti on vasta kehitysvaiheessa, eikä kokeen suunnittelun hetkellä tiedetty erillisten prosessien mittakaavoja, testaukset tehtiin kahdella eri vedyn ja hiilidioksidin suhteella sekä puhtaalla vetyseoksella. Biokaasuprosessin syötteenä oli erilliskerättyä biojätettä. Reaktorin kuormitus pidettiin alhaisena, jotta prosessi pysyisi mahdollisimman tasaisena. Tämä aiheutti kuitenkin sen, että reaktorissa oleva kuiva-ainepitoisuus jäi hyvin alhaiseksi. Sillä oli todennäköisesti vaikutusta vedyn konversioon prosessissa. Tuloksista voidaan kuitenkin todeta, että likaisen vedyn lisääminen reaktoriin ei estänyt tai heikentänyt mädätysprosessia (Taulukko 3).

**Taulukko 3.** Laboratoriomittakaavan tuloksia vedyn syötöstä biokaasuprosessiin. Erolla nimeytyt tulokset on verrattu kontrollireaktorin tuloksiin. Kaikista tuloksista on erotettu syötetty ja jäljelle jäänyt vety.

| -                                   | CH <sub>4</sub> (%)<br>Testi | CH <sub>4</sub> ero<br>Testi-Kontrolli (%) | CO <sub>2</sub> ero<br>Testi-Kontrolli (%) | H <sub>2</sub> kulutus (%) | CH <sub>4</sub> ero (ml CH <sub>4</sub> / g VS) | CO <sub>2</sub> ero (ml CO <sub>2</sub> / g VS) |
|-------------------------------------|------------------------------|--|--|----------------------------|---|---|
| H <sub>2</sub>                      | 62,45±1,12                   | 2,04±1,44                                  | -2,04±1,44                                 | 58,62±5,71                 | -27,2±35,37                                     | -36,99±28,46                                    |
| 2:1 H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub> | 57,53±0,87                   | -2,45±1,15                                 | 2,45±1,15                                  | 59,21±2,58                 | 4,60±39,89                                      | 29,89±33,37                                     |
| 4:1 H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub> | 59,85±1,11                   | -0,81±1,50                                 | 0,81±1,50                                  | 55,39±15,05                | 18,18±70,90                                     | 20,42±42,97                                     |

Molemmilla vedyn ja hiilidioksidin suhteilla testireaktorin pH pysyi korkeammalla kuin kontrollin, vaikka hiilidioksidin lisäämisen reaktoriin odotettiin laskevan pH:ta. Syöttökaasun sisältämä vety reagoi siis hiilidioksidin kanssa tarpeeksi nopeasti, että lisätty hiilidioksidi ei ehtinyt vaikuttaa prosessin pH-arvoon. Vedyn kulutus kokeiden aikana pysyi tasaisena, eikä hiilidioksidin lisäämisellä näyttänyt olevan merkittävää vaikutusta siihen. Suurin rajoittava tekijä vedyn kulutuksessa on sen alhainen liukoisuus veteen. Tuotetussa biokaasussa oli kuitenkin vetyä, eli kaikki reaktoriin syötetty vety ei reagoinut hiilidioksidin kanssa. Tuotetun kaasun kierrätysprosessissa voisi vähentää vedyn osuutta lopullisessa tuotekaasussa. Tässä hankkeessa ei kuitenkaan tätä testattu.

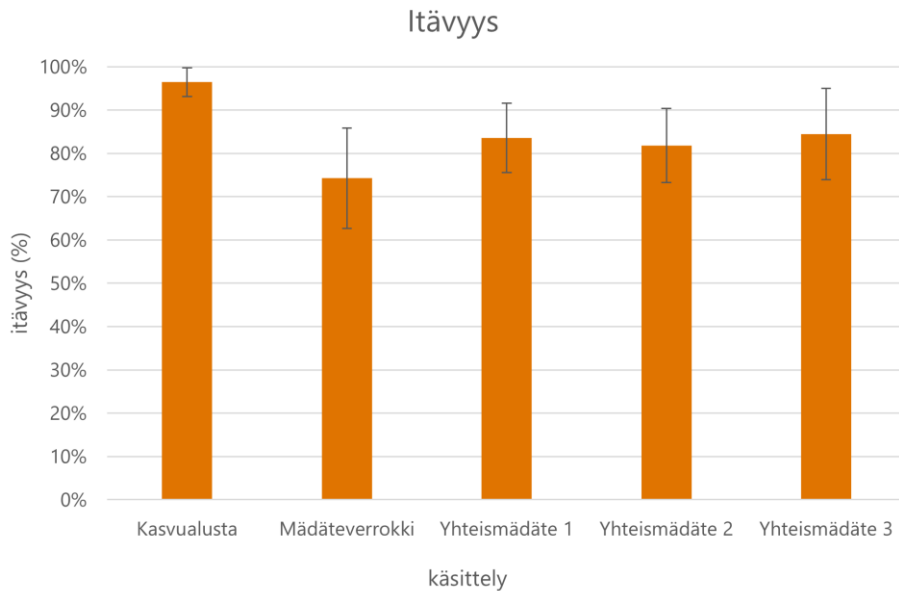
### 3.5. Mädätysjäännöksen ja tuhkan hyödyntäminen

Tavoitteena oli tarkastella kasvatuskokeilla, miten yhteismädätteen ja mekaanisen seoksen (tuhka ja mädätejäännös) käyttäminen lannoitteena vaikuttaa sinapin kasvuun. Sinapin kasvua tarkasteltiin kasvivasteilla, jotka olivat muun muassa sinapin itäminen, kuivan biomassan määrä, kukinta sekä eri raskasmetallien kertyminen sinappikasveihin. Tulosten avulla voidaan harkita mahdollisuutta käyttää näitä eri yhteismädätteitä ja mekaanisia seoksia maanparannusaineina tai kierrätyslannoitteina.

#### 3.5.1. Yhteismädätteen kasvatuskokeet

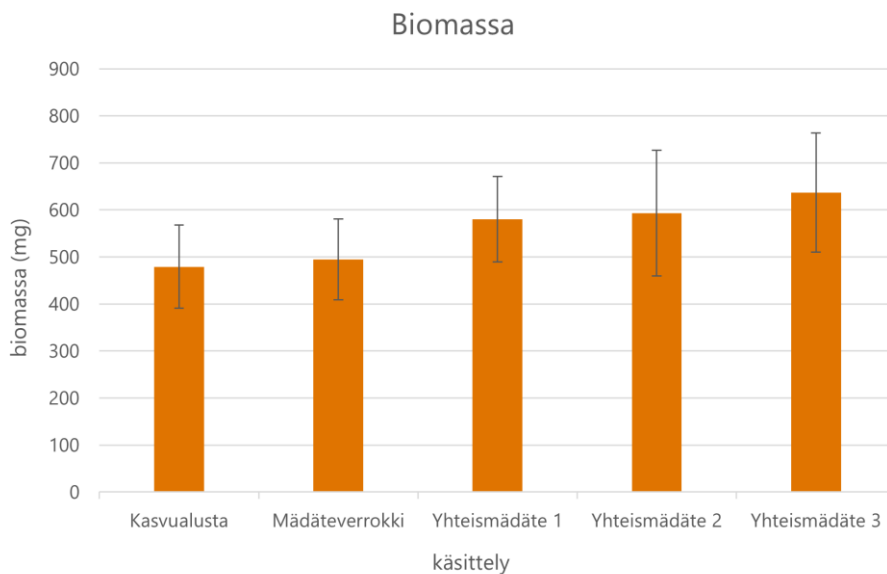
Kasvatuskokeissa kokeiltiin kolmea erilaista yhteismädätettä, joissa jokaisessa oli sekoitettuna eri määrä tuhkaa. Itävyydessä (Kuva 7) huomattiin eroja kasvualustan ja mädätekäsittelyjen

(mädäteverrokki ja yhteismädätteet) välillä. Parhaimmat itämistulokset saavutettiin köyhässä kasvualustassa. Sinappien itämisprosentti oli kasvualustassa 96 %, kun taas mädätekäsittelyssä se vaihteli välillä 74–84 %.



**Kuva 7.** Yhteismädätteiden ja niiden verrokkien itävyys prosentteina. Yhteismädäte 1:ssä on vähiten tuhkaa ja yhteismädäte 3:ssa taas eniten tuhkaa.

Biomassan määrä kasvoi, kun käytettiin yhteismädätettä (Kuva 8). Kasvualustan ja pelkän mädätteen välillä ei havaittu merkittävää tilastollista eroa. Suurimman tuhkalisäyksen sisältämä yhteismädäte tuotti suurimman biomassan, eli tuhkalisäyksellä oli siis positiivinen vaikutus biomassan määrään.



**Kuva 8.** Yhteismädätteiden ja niiden verrokkien biomassa. Yhteismädäte 1:ssä on vähiten tuhkaa ja yhteismädäte 3:ssa taas eniten tuhkaa.



Kukkivien sinappioksidien määrä oli suurin köyhässä kasvualustassa. Yhteismädätteet, joissa oli suurimmat tuhkalisäykset, kukkivat myös paremmin kuin pelkkä mädäneverrokki. Pelkkä mädäneverrokki kukki prosentuaalisesti vähiten.

Kuvassa 9 esitetään kasvualustan ja mädäneverrokin eroja. Tutkimuksissa on havaittu, että ravinteiden niukkuudesta johtuva rasite voi edistää kasvien nopeaa kukintaa (Cho et al. 2016). Tämä saattaa selittää tulokset, joiden perusteella kasvualustan biomassa on vähäinen, mutta kukinta on runsasta. Näiden havaintojen valossa on mahdollista, että niukkaravinteisessa kasvualustassa kasvaneet sinapit ovat eri kasvuvaiheessa verrattuna mädätekäsittelyjen sinappeihin.



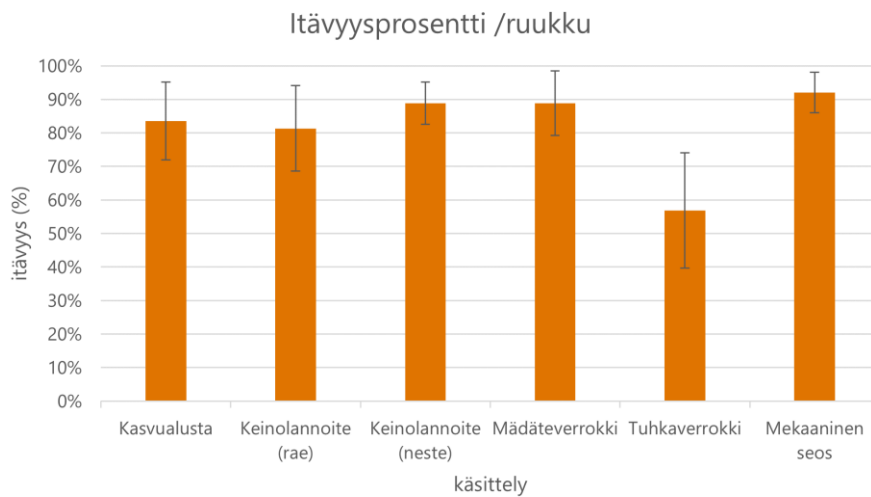
**Kuva 9.** Kasvualustaverrokki (vas) ja mädäneverrokki (oik).

Tulosten perusteella havaittiin, että käytettyjen yhteismädätteiden tai mädäneverrokin lisäys ei merkittävästi lisännyt kasvualustan metallipitoisuuksia. Lisäksi kaikki tutkitut raskasmetallit pysyivät Kansallisen lannoitelainsäädännön asettamien rajojen alapuolella. Mädätejäänöksen tai yhteismädätteen lisääminen sen sijaan kasvatti tyypen määrää kasvualustassa. Typpi on yksi kasvien pääravinteista.

### **3.5.2. Mekaanisen seoksen kasvatuskokeet**

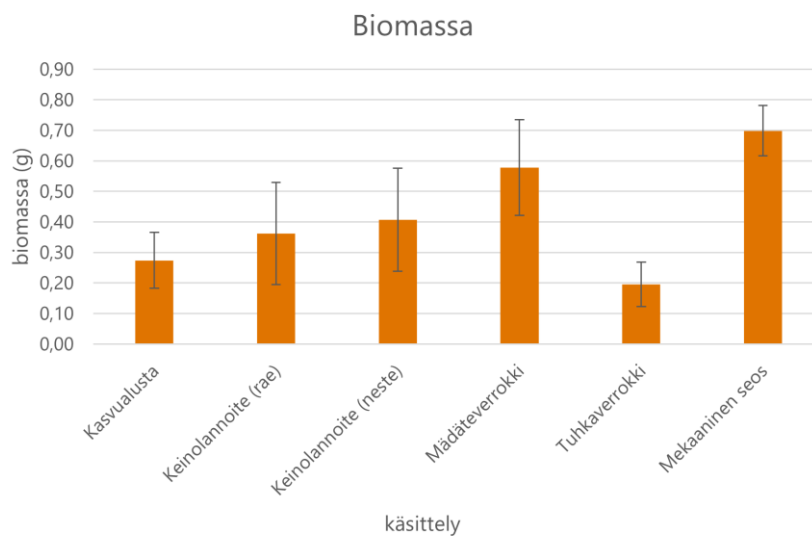
Mekaanisen seoksen kasvatuskokeissa käytettiin yhtä sopivaa tuhkan ja mädätejäänöksen mekaanista seosta, ja sitä verrattiin mädäneverrokkiin, tuhkaverrokkiin ja kahteen erilaiseen keinolannoitteeseen (nestemäinen ja rakeinen). Tässä kasvatuskokeessa käytetty mädäte oli kompostoitua mädätettä. Lisäksi käytettiin kasvualustaverrokkia, joka poikkesi hieman yhteismädätteessä käytetystä kasvualustaverrokista.

Itävyyttä tarkasteltaessa havaitaan, että tuhkaverrokki iti kaikista tutkituista käsittelyistä huonoinen (57 %). Muiden käsittelyjen itävyysprosentti vaihteli välillä 81–92 %, joista mekaanisella seoksella oli suurin itävyysprosentti (Kuva 10).



**Kuva 10.** Mekaanisen seoksen ja verrokkien itävyys prosentteina.

Mädäteverrokilla ja mekaanisella seoksella oli suurin biomassa (Kuva 11), eikä niiden välillä havaittu tilastollisesti merkittävää eroa. Muilla käsittelyillä oli pienempi biomassa, ja pienin biomassa havaittiin tuhkaverrokkissa. Mädätteen lisäys kasvualustaan joko ilman tuhkaa tai tuhkan kanssa edisti siis biomassan kasvua jopa enemmän kuin kaupalliset lannoitevalmisteet. Tämä johtuu todennäköisesti mädätteen sisältämästä orgaanisesta aineksestä.



**Kuva 11.** Mekaanisen seoksen ja verrokkien kuiva biomassa.

Kukkivien sinappioksidien määrässä ei nähty tilastollisesti merkittävää eroa kasvualustaverrokin, mädäteverrokin ja mekaanisen seoksen välillä, joskin kasvualustaverrokkissa hajonta eri yksilöiden välillä oli suurin. Kasvualustaverrokki, mädäteverrokki ja mekaaninen seos kukkivat parhaiten verrattuna muihin käsittelyihin.

Mekaanisen seoksen tai tuhkan/mädätteen lisäys kasvualustaan ei kasvattanut raskasmetallien määrää yli Kansallisen lannoitelainsäädännön asettamien rajojen. Keinolannoitteita ei tutkittu raskasmetallien osalta erikseen, sillä valitut keinolannoitteet ovat markkinoilla olevia kaupallisia tuotteita, mikä automaattisesti takaa niiden raskasmetallimäärän alittavan lainsäädännölliset rajat.

### 3.5.3. Yhteismädätteen ja mekaanisen seoksen käyttö lannoitevalmisteen tai maanparannusaineena

Kasvatuskokeiden tulokset antavat lupaavia näkymiä erityisesti yhteismädätteen mahdollisesta laajamittaisesta käytöstä verrattuna esimerkiksi pelkkään mädätteeseen. Nämä tulokset heijastavat tiettyjen syötteiden ja käytettyjen käsittelyjen vaikutuksia kasvualustan fysikaalis-kemiallisiin ja biologisiin ominaisuuksiin. Yhden komponentin muutoksen tiedetään voivan vaikuttaa tuloksiin. Siksi tulevaisuuden käyttömahdollisuuksia tutkittaessa olisi tärkeää arvioida uudelleen käytettävän tuhkan ja mädätejäännöksen ominaisuudet turvallisuuden ja hygienian varmistamiseksi. Hankkeen tuottamat tutkimustulokset avaavat kuitenkin näkymiä tulevaisuuden käyttöä varten, vaikka aihe edellyttääkin jatkotutkimusta.

## 3.6. Harvinaisten maametallien talteenotto

### 3.6.1. Magneettien liuotus

Liuotusprosessille ei löydetty yksiselitteisiä optimaalisia olosuhteita, vaan paikoin erinomainen liuotustehokkuus (>99 %) saavutettiin käyttämällä monenlaisia olosuhteita tietyin reunaehtoin. Hapon väkevyys ja liuottimen määrä on sidottu toisiinsa, samoin kuin aika ja lämpötila: nostamalla toista voi laskea toista. Lämpötila osoittautui kokeissa tärkeimmäksi muuttujaksi, mutta myös huoneenlämpö riittää, jos liuotusta jatkaa vuorokauden (Taulukko 4).

**Taulukko 4.** Etaanihappoliuotuskokeiden tuloksia eri liuotusolosuhteissa. S/L suhde= kiintoaineen määrän suhde liuoksen määrään.

| Konsentraatio (mol/l) | S/L suhde (m/m) | Aika (h) | Lämpötila (°C) | Liuotustehokkuus |          |
|-----------------------|-----------------|----------|----------------|------------------|----------|
|                       |                 |          |                | Fe (m-%)         | Nd (m-%) |
| 0,4                   | 1/100           | 24       | 20             | 97               | 98       |
| 0,6                   | 1/75            | 3,5      | 50             | 98               | 95       |
| 0,2                   | 1/150           | 1        | 80             | 92               | 94       |
| 1,0                   | 1/150           | 1        | 80             | 100              | 100      |
| 1,0                   | 1/50            | 1        | 80             | 98               | 97       |
| 0,2                   | 1/150           | 6        | 80             | 98               | 99       |
| 1,0                   | 1/150           | 6        | 80             | 100              | 100      |
| 1,0                   | 1/50            | 6        | 80             | 98               | 100      |

Liuotuskokeita suoritettiin myös muilla puhtailla hapoilla, joita syntyy anaerobisessa happoprosessissa (Rasi ym. 2022). Kokeissa havaittiin pian, että etaanihapon lisäksi vain propaanihappo toimi toivotulla tavalla. Pidempiketjuisilla hapoilla liuotustehokkuus oli hyvin alhainen. Yksittäisten happojen lisäksi kokeiltiin anaerobisella käymisellä tuotettujen happoseosten koostumusta jäljittelevää synteettistä happoseosta, jolloin havaittiin pidempiketjuisten happojen myös haittaavan liuotusprosessia. Vaikka etaani- ja propaanihapot toimivat liuotuksessa hyvin, butaani-, pentaani- ja heksaanihappojen läsnäolo alensi liuotustehokkuutta merkittävästi (Taulukko 5).

**Taulukko 5.** Puhtailla hapoilla ja happoseoksilla tehtyjen liuotuskokeiden tuloksia. S/L suhde= kiintoaineen määrän suhde liuoksen määrään.

| Liuotin       | Konsentraatio (mol/l) | S/L suhde (m/m) | Aika (h) | Lämpötila (°C) | Liuotustehokkuus |          |
|---------------|-----------------------|-----------------|----------|----------------|------------------|----------|
|               |                       |                 |          |                | Fe (m-%)         | Nd (m-%) |
| Propaanihappo | 0,5                   | 1/100           | 24       | 20             | 86               | 85       |
| Butaanihappo  | 0,5                   | 1/100           | 24       | 20             | 40               | 44       |
| Pentaanihappo | 0,5                   | 1/100           | 24       | 20             | 17               | 8        |
| Heksaanihappo | 0,5                   | 1/100           | 24       | 20             | 7                | 0        |
| Seos          | 0,5                   | 1/100           | 24       | 20             | 23               | 29       |
| Seos          | 0,5                   | 1/150           | 24       | 20             | 21               | 26       |
| Seos          | 1,0                   | 1/100           | 24       | 20             | 41               | 48       |
| Seos          | 1,0                   | 1/150           | 24       | 20             | 29               | 40       |
| Seos          | 0,5                   | 1/100           | 24       | 100            | 76               | 88       |
| Seos          | 1,0                   | 1/100           | 24       | 100            | 52               | 100      |

Liuotuskokeita suoritettiin myös Luonnonvarakeskuksen anaerobisella happoprosessilla tuotetuilla seoksilla, joille oli tehty erilaisia puhdistus- ja erotusprosesseja. Konsentroidun tai vähän konsentroituneiden liuosten kanssa liuotustulokset olivat varsin heikkoja. Laimeita seoksia koetettiin myös terästä puhtaalla etikalla, mutta edes korkeampi etikapitoisuus ei korjannut pidempiketjuisten happojen aiheuttamaa haittaa, jos niiden pitoisuus oli merkittävä. Liuotustuloksiin saatiin merkittävä parannus (100 % liuotustehokkuus), kun tuotettua happoseosta konsentroidiin ja rasvahapot eristettiin saostus-haihdutusmenetelmällä (Taulukko 6). Happoseos toimi liuotuksessa tehokkaasti myös laimennettuna 1 mol/l pitoisuuteen, sen sijaan laimentaminen 0,5 mol/l pitoisuuteen laski liuotustehokkuuden noin 60 %:iin. Metallien talteenottoa varten happojae tulee siis esikäsitellä saostus-haihdutusmenetelmällä tehokkaasti liuotuksen aikaansaamiseksi, ja tavoitepitoisuus etikkahapolle on noin 1 mol/l.

**Taulukko 6.** Valikoituja tuloksia liuotuskokeista, joissa käytettiin anaerobisella happoprosessilla tuotettuja happoseoksia.

| Liuotin | Konsentraatio (mol/l) | S/L suhde (m/m) | Aika (h) | Lämpötila (°C) | Liuotustehokkuus |          |
|---------|-----------------------|-----------------|----------|----------------|------------------|----------|
|         |                       |                 |          |                | Fe (m-%)         | Nd (m-%) |
| RO1     | 0,14 + 0,5            | 1/100           | 24       | 20             | 60               | 55       |
| RO2     | 0,16 + 0,5            | 1/100           | 24       | 20             | 52               | 33       |
| RO3     | 0,16 + 0,5            | 1/100           | 24       | 20             | 46               | 31       |
| SH1     | 2,7                   | 1/100           | 24       | 20             | 100              | 100      |
| SH2     | 1,0                   | 1/100           | 24       | 20             | 95               | 94       |
| SH3     | 0,5                   | 1/100           | 24       | 20             | 59               | 62       |

RO1= Käänteisosmoosin jälkeinen seos, terästetty etikkahapolla

RO2= Käänteisosmoosin jälkeinen seos, terästetty etikkahapolla

RO3= Käänteisosmoosin jälkeinen seos, terästetty etikkahapolla

SH1= Saostus-haihdutusprosessin jälkeen saatu seos

SH2 = Saostus-haihdutusprosessin jälkeen saatu seos, laimennettuna

SH3 = Saostus-haihdutusprosessin jälkeen saatu seos, laimennettuna

### 3.6.2. Raudan erotus

Liuottamisen jälkeen selvitettiin raudan erottamista liuoksesta. Erotusmenetelmänä tutkittiin hapettamalla saostamista, koska se on yksinkertainen menetelmä ja sitä on käytetty muissa samankaltaisissa sovelluksissa. Liuennut rauta muuttuu hapettamalla sellaiseen muotoon, jossa se saostuu liuoksesta vielä varsin matalassa pH:ssa.

Hapettimena voisi käyttää kirjavaa joukkoa eri kemikaaleja, mutta kokeissa päädyttiin kokeilemaan happea (ilmaa) ja vetyperoksidia, koska niiden käyttö ei tuo liuokseen vieraita alkuaineita. Vetyperoksidi ei kuitenkaan toiminut halutulla tavalla, joten kokeita jatkettiin ilmaukseen keskittyen.

Saostuskokeissa vaihdeltiin liuoksen pH-arvoa eli happamuutta, lämpötilaa ja aikaa. Matalampi pH hidasti reaktiota, ja korkeampi pH aiheutti jo muidenkin metallien saostumista enenevässä määrin. Lämpötilalla havaittiin olevan merkittävä vaikutus saostusreaktion etenemisnopeuteen, mutta toisaalta liian korkea lämpötila haittasi reaktiota, koska kaasujen (happi mukaan lukien) liukoisuus veteen laskee lämpötilan kasvaessa.

Parhaiksi havaituissa olosuhteissa (pH = 5, T = 80 °C, t = 2 h) saatiin saostettua 99 % raudasta, ja vain 5 % neodyymistä saostui raudan kanssa (Niskanen ym. 2022).

### 3.6.3. Harvinaisten maametallien erotus

Harvinaisten maametallien erottamiseen käytettiin vakiintunutta oksaalihapposaostusta. Liuoksessa kolmenarvoisina ioneina esiintyvät harvinaiset maametallit ( $REE^{3+}$ ) muodostavat oksalaatti-ionien ( $C_2O_4^{2-}$ ) kanssa veteen liukenemattoman suolan  $REE_2(C_2O_4)_3$ . Muodostuneen oksalaattisuolan saa erotettua helposti suodattamalla. Kokeissa tuotetut saostumat analysoitiin ja niiden puhtaus – eli harvinaisten maametallien osuus määritetyistä metalleista – oli keskimäärin 94,50 m-% ja parhaimmillaan 97,29 m-%. Epäpuhtauksina esiintyi pieninä pitoisuuksina kaikkia muita magneettien sisältämiä alkuaineita (Al, B, Co, Fe ja Ni) yhteensä keskimäärin 2,66 m-%.

#### **3.6.4. Pilot-kokeet**

Liutuksen havaittiin käyttäytyvän pilot-kokeissa hyvin samalla tavalla kuin pienemmässä mitataavassa ja liuotustehokkuudet olivatkin >99 %. Raudan saostamisessa kohdattiin muutamia haasteita, ja näistä valtaosa liittyi kuitenkin koeasetelmaan ja käytettyihin instrumentteihin. Lisäksi ilmauksen aiheuttama vaahtoaminen muodostui tässä skaalassa ongelmaksi, ja se saatiin ratkaistua lisäämällä reaktoriin vaahtoamisenestoaineeksi pieni määrä 1-oktanolia. Kun prosessin keskeiset parametrit saatiin paremmin hallintaan, saavutettiin raudan saostukselle aiempia tuloksia vastaavia >99 % saostustehokkuuksia.

Oksaalihapposaostus suoritettiin parhaiten onnistuneelle pilottikoe-erälle. Tällä kertaa saatu REE-oksalaattisaostuma myös kalsinoitiin eli hajotettiin korkeassa lämpötilassa (1000 °C) tuottaen REE-oksidiin seos. Saadun tuotteen todettiin sisältävän pääasiassa harvinaisten maametallien oksideja ( $\text{REE}_2\text{O}_3$ ) ja puhtauden olevan 99,08 m-%. Epäpuhtauksiakin havaittiin vähemmän kuin aiemmissa laboratoriokokeissa: alumiinia 0,75 m-% ja booria 0,03 m-%.

## 4. Malliprosessin kannattavuus

### 4.1. Malliprosessi

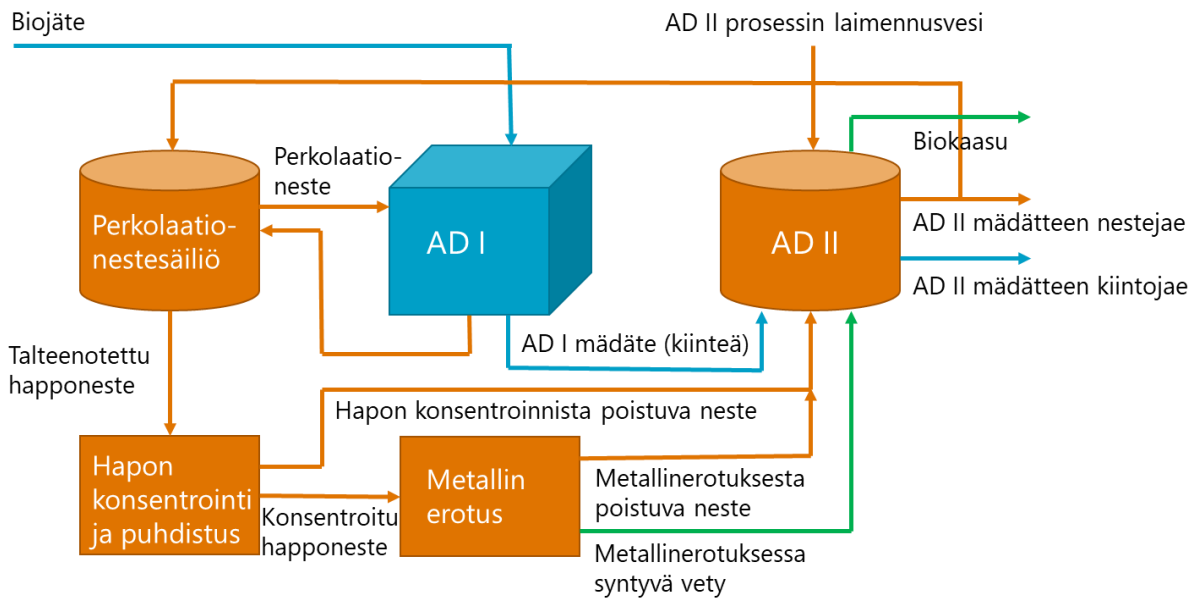
Tehtyjen laboratorio- ja pilot-mittakaavan kokeiden perusteella rakennettiin malli (Kuva 12), jossa orgaanisten happojen tuottoa biojätteestä sovitettiin tuotantomittakaavaan. Lähtöoletuksena käytettiin biojätteen määrä 273 t/vko, mikä vastaa suunnilleen tämänhetkistä Jyväskylän Mustankorkealle saapuvan biojätteen määrää. Kaksivaiheinen anaerobinen prosessi rakennettiin laboratoriomittakaavan kokeiden perusteella niin, että ensimmäinen vaihe on suotopetireaktori (ADI) ja toinen vaihe korkean kiintoaineen biokaasuprosessi (ADII). Suotopetireaktorista kerätään happopitoista nestettä konsentroidin- ja puhdistusprosessiin ja suotopetireaktoriin palautetaan uutta korvaavaa nestettä AD II prosessista. Happojen konsentroidin- ja puhdistus tehdään kaksivaiheisella haihdutuksella. Perkolaationestesäiliöstä poistuvan nesteen etikkahappopitoisuus oletettiin olevan tasainen (10 g/l) ja lopputuotteen etikkahapon oletettiin olevan 60 g/l. ADII prosessista tuotetaan biometaania liikennekäyttöön, sekä mädätettä lannoitteeksi/maanparannusaineeksi. Tarvittavaa lisänestettä ADII prosessiin saadaan sekä hapon konsentroidinnista että metallinerotuksesta. Tämän lisäksi tarvitaan mahdollisesti vielä lisäksi laimennusvettä.

Metallinerotusprosessille ei laskettu taloudellista kannattavuutta, vaan orgaanisen hapontuotannon kannattavuus laskettiin etikkahapon markkinahinnan mukaan. Rajausta tehtiin siitä syystä, että metallinerotukseen tuotantomittakaavassa ei vielä saatu riittävän hyviä lähtötietoja tehtyjen laboratorio- ja pilot-kokeiden perusteella, jotta prosessin kannattavuutta olisi voinut luotettavasti arvioida. Etikkahapon käyttökohteeksi valittiin mallissa kuitenkin paikan päällä tapahtuva metallinerotus, jolloin prosessien välinen nestekierto voitiin huomioida. Lisäksi metallinerotuksessa syntyy vetykaasua, joka oletettiin johdettavan biokaasuprosessiin (AD II). Taloudellisesti kannattavan metallinerotusprosessin kapasiteetiksi on tässä arvioitu 2 000 kg metallia viikossa, jolloin 1 M happoliuosta (60 g/l) tarvittaisiin 40 m<sup>3</sup>/vko. Tässä mittakaavassa vain osa tarvittavasta happoseoksesta voidaan tuottaa valitulla biojättemäärällä (noin 23 m<sup>3</sup>/vko). Tässä esimerkissä on oletettu, että loppuosa tarvittavasta haposta ostetaan.

Prosessin kannattavuutta arvioitiin biojätteen kahden vaihtoehdoisen käytön (A ja B) kautta:

- A: biojätteestä valmistetaan biometaania liikennekäyttöön
- B: biojätteestä valmistetaan kaksivaiheisella AD-prosessilla (AD I & AD II) lyhytketjuisia orgaanisia happoja ja biometaania

Talouselaskennan menetelmät on kuvattu tarkemmin Liitteessä 3.



**Kuva 12.** Hapon tuotto biojätteestä ja käyttö metallinerotukseen, prosessin kiintoaine- (sininen, neste- (oranssi) ja kaasuvirrat (vihreä).

## 4.2. Happotuotannon kannattavuus verrattuna biokaasuprosessiin

Vaihtoehdossa A (biometaanin tuotto), lopputuotteena syntyy biometaania liikennekäyttöön 1 152 312 kg/vuosi. Kannattavuuslaskennassa ei huomioitu biojätteen vastaanotosta aiheutuvia kustannuksia eikä toisaalta myöskään biojätteen käsittelystä saatavaa porttimaksua, koska tavoitteena oli verrata vaihtoehtoisia lopputuotteita (biometaani ja/tai happoseos) keskenään. Myöskään käsittelyjäännöksen separoidun neste- ja kuivajakeen lannoitekäytöstä saatavaa tuloa ei huomioitu, koska tulon (n. 1 €/kg liukoisia ravinteita peltoon levitetynä) oletettiin olevan samaa suuruusluokkaa kuljetus- ja levityskustannusten kanssa (Horn ym. 2020). Näin ollen vaihtoehdossa A saatiin tuloa ainoastaan biometaanin myynnistä liikennekäyttöön omalta tankkausasemalta. Biokaasulaitosinvestointia varten oletettiin saatavan 25 %:n investointituki (TEM 2023). Laskentakorkokantana annuiteetin laskennassa käytettiin 5 %. Investointi on tehdyillä oletuksilla kannattava: vuositulo 1 058 713 € ja takaisinmaksuaika 2,1 vuotta.

Vaihtoehdossa B (happotuotto ja biometaanin tuotto), lopputuotteena saadaan happoseos 23 m<sup>3</sup>/vko (happokonsentraatio 60 g/l etikkahapolle) sekä biometaania liikennekäyttöön 600 066 kg/vuosi. Biokaasulaitosinvestointia varten oletettiin saatavan 30 %:n investointituki (TEM 2023), joka on mahdollista saada uuteen teknologiaan perustuvilla hankkeilla. Laskentakorkokantana annuiteetin laskennassa käytettiin 5 %. Investointi on tehdyillä oletuksilla kannattava: vuositulo 287 223 € ja takaisinmaksuaika 5,4 vuotta. Vaikka itse metallinerotuksen kannattavuutta ei arvioitu, otettiin laskennassa kuitenkin huomioon metallinerotuksesta saatavan vetykaasun arvioitu määrä. Tällä tosin ei ollut merkittävää vaikutusta kaksivaiheisen prosessin kannattavuuteen. Teollisen symbioosin merkittävin hyöty on, että laimealle ja epäpuhtaalle happoseokselle voidaan osoittaa hyödyntäjä ilman suuria kuljetuskustannuksia. Toinen merkittävä hyöty on veden kierto alueella, sillä toisen vaiheen AD-prosessin tarvitsema

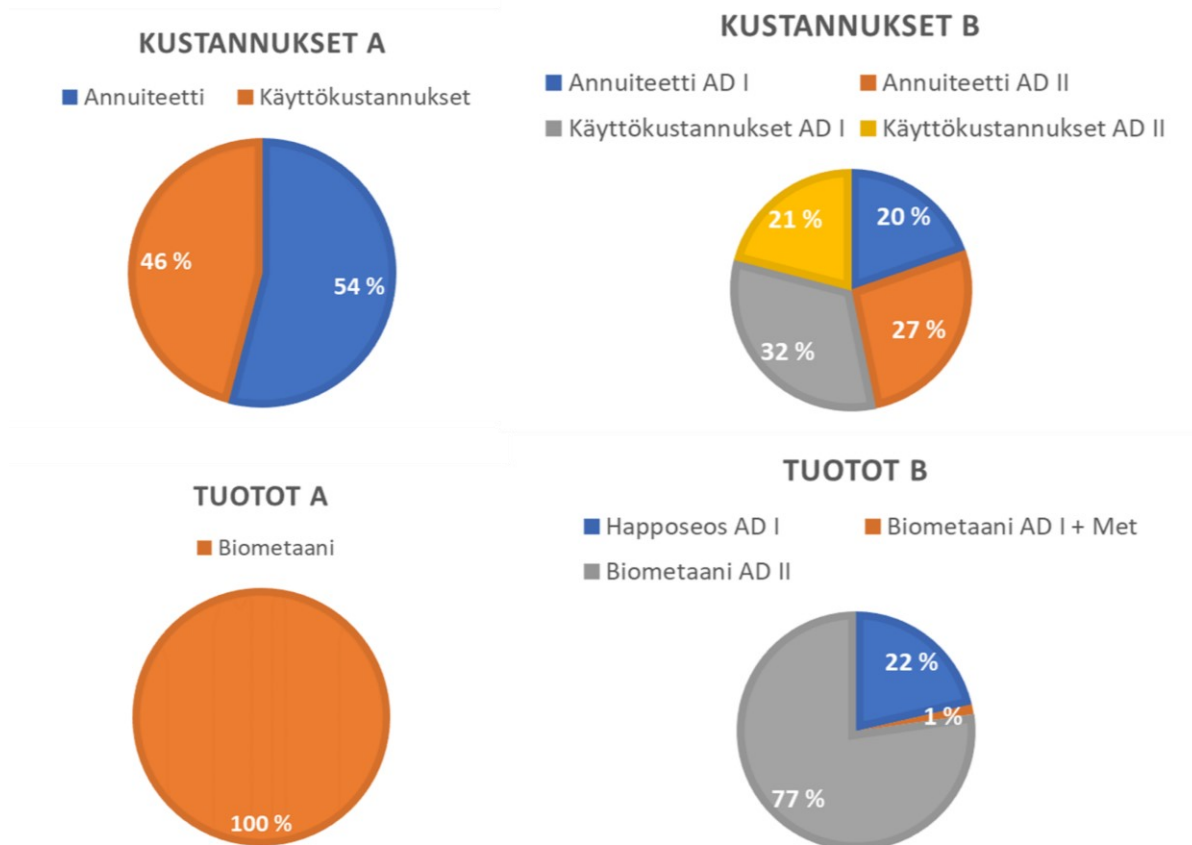


laimennusvesi saadaan sekä hapon konsentroinnista että metallinerotusprosessista. Näin eri prosessivaiheiden nestejakeet kiertävät alueella.

Kannattavuuslaskennan tuloksia ei voi pitää absoluuttisina. Tavoitteena oli ainoastaan kahden erityyppisen prosessin keskinäinen vertailu. Vertailussa tehtiin molemmille prosesseille samanlaiset lähtöoletukset, jotka eivät välttämättä kuitenkaan sisällä kattavasti kaikkia kustannuksia esim. biojätteen vastaanotosta aiheutuvia kustannuksia ei huomioitu.

Kannattavuuslaskennan suurimmaksi epävarmuustekijäksi arvioitiin hapontuotto prosessin skaalaus tuotantomittakaavaan. Hapontuotto prosessia mallinnettiin suotopetiprosessilla. Biojättesyötteen sopivuutta teknisiltä ominaisuuksiltaan suotopetiprosessiin tuotantomittakaavassa ei kuitenkaan testattu. Syöte saattaa todellisuudessa pakkautua liian tiiviiksi, jolloin se tarvitsisi jonkin toisen lisäsyötteen (esim. puutarhajäte) tuomaan pakattuun petiin lisää huokoisuutta. Lisäsyötettä, tai sen vaatimaa lisäkapasiteettia, ei huomioitu kannattavuuslaskennassa. Myös hapon konsentroidin käyttökustannukset perustuivat tehtyihin laboratoriokeksiin eikä hankkeen aikana ehditty tehdä prosessikehitystä eikä prosessin optimointia.

Tehdyssä vertailussa vaihtoehdon B (kaksivaiheinen AD, lopputuotteena etikkahappo ja biometaani) kannattavuus jää heikommaksi kuin vaihtoehdon A (yksivaiheinen AD, lopputuotteena biometaani). Vaihtoehdossa B kahden peräkkäisen prosessin operointi lähes tuplaa käyttökustannukset ja erityisesti hapon konsentroidin sähkökustannus on korkea, mikä näkyy kuvassa 13 AD I -prosessin korkeana suhteellisena käyttökustannuksena. Happoliuoksesta saatu tulo ei kuitenkaan vastaa kohonneisiin käyttökustannuksiin vaan myös vaihtoehdossa B merkittävin osuus tuloista saadaan biometaanin myynnistä.



**Kuva 13.** Vaihtoehtojen A ja B kustannusten ja tuottojen muodostuminen.

Tehtyyn kannattavuuslaskentaan vaikutti eniten syötteen biokemiallinen metaanintuottopotentiaali (BMP). Projektissa raaka-aineena käytetyn biojätteen BMP oli analyysin mukaan jopa  $682 \text{ Nm}^3\text{CH}_4/\text{tVS}$ , mutta Biokaasulaskurissa (Luke 2022) biojätteen BMP on laajempaan aineistoon pohjautuen huomattavasti matalampi  $450 \text{ Nm}^3\text{CH}_4/\text{tVS}$ . Herkkyystarkastelussa käytettiin tätä alemmaa arvoa (Taulukko 7).

**Taulukko 7.** Biokemiallisen metaanintuottopotentiaalin (BMP) ja biometaanin hinnan vaikutus prosessien kannattavuuteen.

| Metaanintuotto                              | Vaihtoehto A |                       | Vaihtoehto B |                       |
|---|--------------|-----------------------|--------------|-----------------------|
|   | Tulos (€)    | Takaisinmaksuaika (v) | Tulos (€)    | Takaisinmaksuaika (v) |
| BMP $682 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{tVS}$ | 1 058 713    | 2,1                   | 291 223      | 5,4                   |
| BMP $450 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{tVS}$ | 558 818      | 3,2                   | 4 179        | 9,9                   |

Oletettu metaanintuotto vaikutti oleellisesti myös kaksivaiheisen AD-prosessin kannattavuuteen (Vaihtoehto B), koska orgaanisten happojen lisäksi myös tässä prosessissa tuotettiin merkittävästi biometaania liikennekäyttöön. Vaihtoehdon B kannattavuuteen vaikuttaa myös orgaanisten happojen hintakehitys. Herkkyystarkastelua ei tehty, mutta orgaanisten happojen hinnan voi kuitenkin olettaa nousevan, koska peruskemikaaleja tuotetaan edelleen pääosin fossiilisista raaka-aineista. Niiden käytöstä tullaan vähitellen luopumaan. Saksassa kehitys on jo lähtenyt eteenpäin ja vuonna 2020 kemianteollisuuden raaka-aineista 13 % oli uusiutuvia (Schwab 2023).

## 5. Yhteenveto

Hankkeessa selvitettiin anaerobisella prosessilla tuotetun happojakeen käyttöä metallien talteenottamiseksi kestoprojektista. Happojakeen konsentroidin prosessoinnin aikana onnistui parhaiten käyttämällä panostamista prosessia sekä tuhkaa syötteen lisänä nostamaan prosessin pH:ta. Happojakeen havaittiin kuitenkin sisältävän liuotukseen tarvittavan etikkahapon lisäksi myös muita, liuotusta haittaavia orgaanisia happoja. Kokeissa havaittiin, että hyvän liuotustehon (94–100 %) saavuttamiseksi happojaetta tulee konsentroida edelleen ja puhdistaa muista orgaanisista jakeista. Tässä hankkeessa vaadittavaan lopputulokseen päästiin saostus-haihdutusmenetelmää käyttämällä. Liuotuksen jälkeen rauta saadaan poistettua liuoksesta ilmauksen avulla ja harvinaiset maametallit saostettua oksalaatteina. Pilot-kokeissa saadun harvinaisten maametallien tuotteen puhtaus oli 99,1 m-% kalsinoinnin jälkeen.

Anaerobisen prosessin mädätysjäännöksen ja voimalaitostuhkan lannoitevaikutuksia sinapin kasvuun selvitettiin kahdessa eri kasvatuskokeessa. Ensimmäisessä kokeessa voimalaitostuhkaa oli lisätty suoraan anaerobiseen prosessiin, ja toisessa kokeessa tuhka oli sekoitettu kompostoituu mädätejäännökseen. Kun tuhkaa oli lisätty suoraan anaerobiseen prosessiin, suuremmalla tuhkalisäyksellä oli sinapin biomassaa lisäävä vaikutus verrattuna pelkkään mädätteeseen tai köyhään kasvualustaan. Samoin kun tuhka lisättiin kompostoituu mädätteeseen, sinapin biomassan määrä oli suurempi kuin verrokkeina käytetyissä keinolannoitetuissa sinapeissa. Molemmista kokeista määritettiin kasveihin mahdollisesti kertyvät raskasmetallit, ja havaittiin tulosten alittavan kansallisen lannoitelainsäädännön asettamat rajat. Tuhkalisyys anaerobiseen prosessiin ja kompostoituu mädätteeseen toimi näissä kasvatuskokeissa siis erittäin lupaavasti biomassan kasvua lisäävänä tekijänä.

Hankkeessa tehty kannattavuustarkastelu rajattiin lopulta hapontuoton kannattavuuteen. Hapontuottoa verrattiin tilanteeseen, jossa samaa raaka-ainetta käytettäisiin biometaanin tuotantoon. Molemmat vertailut prosessit osoittautuivat kannattaviksi, mutta yksivaiheinen prosessi biometaanintuotantoon osoittautui tämänhetkisin hinnoin kannattavammaksi. Myös hapontuotto prosessin tuotantomittakaavan mallinnukseen jäi suuria epävarmuuksia valitun laitostyyppin ja hapontuotuksen ja konsentroidin saannon ja energiatehokkuuden osalta.

Fossiilisten raaka-aineiden käytöstä tulee vähitellen luopua myös kemianteollisuudessa. Biojäte soveltuu korvaavaksi raaka-aineeksi hyvin sen korkean orgaanisen aineen pitoisuuden takia. Happoprosessin jatkokehityksessä on myös mahdollista parantaa saantoa ja pienentää energiankulutusta. Kun lisäksi metallien talteenotto prosessista saadaan kerättyä lisää taustadataa tukemaan tuotantomittakaavan mallinnusta, on kiertotalousekosysteemin kokonaisuunnittelussa mahdollista löytää lisää synergioita sekä automatisoida prosessia pidemmälle kuin nyt oletettiin. Lopputuotteena saatavan kierrätysmetallin hiilijalanjälki jää pienemmäksi, kun metallin liuotukseen käytetään uusiutuvasta raaka-aineesta valmistettua happoa. Sillä voi tulevaisuudessa olla paljonkin merkitystä teollisuuden raaka-ainevalinnoissa.

## Viitteet

- Ciacci, L., Vassure, I., Cao, Z., Liu, G. & Passarini, F. 2019. Recovering the “new twin”: Analysis of secondary neodymium sources and recycling potentials in Europe. *Resources Conservation and Recycling* 142:143-152.
- European Commission. 2010. Report on critical raw materials for the EU, Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials, European Commission, 1-85.
- Horn, S., Seppänen, A-M., Winqvist, E., Lehtoranta, S., Luostarinen, S. 2020. Biokaasulaitoksen mädätysjäännöksen hyödyntämismahdollisuudet – vaihtoehtojen ilmastovaikutukset ja taloudellisuus. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 42/2020. <http://hdl.handle.net/10138/321266>
- Jiang, J., Zhang, Y., Li, K., Wang, Q., Gong, C. & Li, M. 2013. Volatile fatty acids production from food waste: Effects of pH, temperature, and organic loading rate. *Bioresource Technology* 143: 525–530. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.06.025>
- Kleerebezem, R., Joesse, B., Rozendal, R. & Van Loosdrecht, M.C.M. 2015. Anaerobic digestion without biogas? (Vsk. 14). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/s11157-015-9374-6>
- Kymäläinen, M., Pakarinen, O. & Suomen Biokaasuyhdistys ry. 2015. Biokaasuteknologia, Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen. Hämeenlinnan ammattikorkeakoulu HAMK, Hämeenlinna.
- Larsson, S. 2023. KIRE-hankkeen raportti. Käyttökelpoisuus selvitys. <https://www.jyu.fi/science/fi/kemia/tutkimus/kemian-kiertotalous/kiertotalouden-ekosysteemi/tuloksia/tuhkan-ja-madatejaannoksen-hyodyntaminen-lannoitevalmisteen-1/kayttokelpoisuus selvitys>
- Luke 2022. Biokaasulaskuri. <https://maatalousinfo.luke.fi/fi/laskurit/biogas>
- Luostarinen, S., Tampio, E., Lehtoranta, S., Valve, H., Laakso, J., Rasi, S., Pyykkönen, V., Markkanen, J., Heikkinen, J., Haapala, H., Winqvist, E., Lång, K., Timonen, K. & Silfver, T. 2023. Kestävät käytännöt biokaasutuotannossa. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2023:32. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-479-8>
- Niskanen, J., Lahtinen, M. & Perämäki, S. 2022. Acetic acid leaching of neodymium magnets and iron separation by simple oxidative precipitation. *Cleaner Engineering and Technology* 10: 100544. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100544>
- Palva, R. 2019. Konetyön kustannukset ja tilastolliset urakointihinnat. TTS:n julkaisu 447. [https://www.tts.fi/files/2480/Konetyon\\_kustannukset\\_ja\\_tilastolliset\\_urakointihinnat\\_20.9.2019.pdf](https://www.tts.fi/files/2480/Konetyon_kustannukset_ja_tilastolliset_urakointihinnat_20.9.2019.pdf)
- Rasi, S., Vainio, M., Blasco, L., Kahala, M., Leskinen, H. & Tampio, E. 2022. Changes in volatile fatty acid production and microbiome during fermentation of food waste from hospitality sector. *Journal of Environmental Management* 308: 114640 <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114640>

- Rasi, S., Veijanen, A. & Rintala, J. 2007. Trace compounds of biogas from different biogas production plants. *Energy* 32(8): 1375–1380. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2006.10.018>
- Schwab, E. 2023. Raw Material Change in the Chemical Industry. *Chemistry Views* June 27: 2023. <https://doi.org/10.1002/chemv.202300033>
- Tampio, E., Vainio, M., Virkkunen, E. & Rahtola, M. 2018. Opas kierrätyslannoitevalmisteiden tuottajille. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 37/2018. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 73 s.
- TEM 2023. Tuettavat hankkeet ja tuen enimmäismäärät. <https://tem.fi/tuettavat-hankkeet>
- Wainaina, S., Lukitawesa, Kumar Awasthi, M., & Taherzadeh, M. J. 2019. Bioengineering of anaerobic digestion for volatile fatty acids, hydrogen or methane production: A critical review. *Bioengineered*, 00(00), 437–458. <https://doi.org/10.1080/21655979.2019.1673937>
- Vainio, M. & Rasi, S. 2023. Short-chain organic acids from food waste. Biorestec, Italy, 16.5.2023 Oral presentation.
- Zhou, F., Wang, C. & Wei, J. 2013. Separation of acetic acid from monosaccharides by NF and RO membranes: Performance comparison. *Journal of Membrane Science* 429: 243–251.

## Liitteet

### Liite 1. Menetelmät kaksivaiheinen anaerobinen prosessi sekä happojakeen puhdistus ja konsentrointi

#### Anaerobinen happoprosessi

Kun anaerobisen happoprosessin lähtökohtana käytetään biokaasuprosessissa olevaa mikrobiston sekapopulaatiota, on prosessiolosuhteet tehtävä sellaisiksi, että metaania tuottavien mikrobien (metanogeenien) toiminta heikentyy huomattavasti tai estyy kokonaan. Tässä hankkeessa tämä tehtiin lisäämällä prosessin orgaanista kuormitusta niin paljon, että pH prosessissa laskee metanogeenille epäsuotuisaksi ( $\text{pH} < 6$ ).

Tässä hankkeessa happofermentoinnissa käytettiin reaktoreita (Belach ab), joita operoitiin sekä jatkuvasekoitteisina tankkireaktoreina (CSTR, continuous stirred tank reactor) että suotopeti reaktoreina (LBR, leach bed reactor).

Happofermentaation aikana pH pyrkii laskemaan lisää happojen muodostuessa. pH:n tippuessa alle viiden myös happoja muodostavien mikrobeiden toiminta heikkenee ja lopulta aiheuttaa prosessin kaatumisen (Jiang et.al 2013). CSTR reaktoreissa pH:ta pyrittiin tasapainottamaan laskemalla orgaanista kuormitusta. Suotopetireaktorissa tämä pH:n tasapainottaminen tapahtui poistamalla reaktorista happoa sisältävää nestettä ja korvaamalla se biokaasureaktorista poistetun mädätteen separoidulla nestejakeella. Lisäksi suotopetireaktorin panokseen lisättiin polttolaitoksen emäksistä tuhkaa kahdella eri pitoisuudella.

Lopuksi happoprosessia testattiin pilotmittakaavassa, käyttämällä  $1 \text{ m}^3$  kokoista suotopetireaktoria. Tässä kokeessa perkolaationesteenä käytettiin täyden mittakaavan suotopetireaktorin perkolaationestettä. Metanogeenien de-aktivointi tehtiin nostamalla prosessin aluksi perkolaationesteen kiertonopeutta. Kokeen kesto oli 26 päivää ja happopitoista nestettä otettiin talteen päivien 4, 11, 18 ja 26 jälkeen.

#### Tuotetun happojakeen puhdistus ja konsentrointi

Happoprosessista tuotettuja orgaanisia happoja käsiteltiin edelleen, jotta ne soveltuisivat metallienerotukseen. Nestettä käsiteltiin sekä kalvosuodatuksella että yhdistetyllä saostus- ja haihdutusprosessilla. Tavoitteena oli nostaa happojen pitoisuutta nesteessä sekä poistaa nesteestä kiintoainesta. Ennen kalvo- ja haihdutusprosesseja, tuotettu neste separoitiin käyttämällä dekanterilinkoa. Haponesteiden puhdistus- ja konsentroidinkokeissa käytettiin pilotkokeesta saatuja haponesteitä.

Membraaniteknologiat (kalvoerotustekniikat) ovat osoittaneet olevan tehokkaista verrattuna perinteisiin erotusprosesseihin (Zhou ym. 2013). Tässä hankkeessa käytettiin mikro-suodatusta sekä käänteisosmoosia happoseoksen puhdistamiseen sekä happojen konsentroidintiin (Labstack M20, Alfalaval). Mikro-suodatuksessa käytettiin polysulfonista, polypropyleenillä tuettua kalvoa, jonka huokoskoko oli  $0,2 \mu\text{m}$  (MFG2, Alfalaval). Käänteisosmoosissa kalvo oli ohutta komposiitti polyamidia, myös polypropyleenillä tuettua (RO98pHt, Alfalaval). Molemmissa aktiivinen kalvopinta-ala oli  $0,018 \text{ m}^2$ . pH:n säätöä ei tehty ennen kumpaakaan kalvosuodatusta.

Toinen menetelmä, jota hankkeessa käytettiin happonesteen konsentroiintiin, perustui saostukseen sekä haihdutukseen. Orgaanisten happojen erotus vesiliuoksesta on haastavaa, sillä esimerkiksi voi happo muodosta veden kanssa kiehuvan seoksen ja etikkahapon samankaltaisuus veden kanssa estää yhdisteen erottumisen vedestä yksinkertaisen tislauksen avulla. Tämä vuoksi happoprosessista tuotettu neste neutraloitiin natriumbikarbonaatilla, jotta liuoksessa oleva hapot saatiin muutettua suoloiksi. Tämän jälkeen nesteestä haihdutettiin suurin osa vedestä. Orgaaniset hapot vapautettiin käsittelemällä kiinteä jäännös rikkihapolla, jonka jälkeen hapot voitiin erottaa massasta uuttamalla alipaineessa. Tulokset laskettiin kolmen käsittelykerran keskiarvoista. Lopuksi menetelmää testattiin vielä suuremmassa mittakaavassa, jolloin ensimmäisenä vaiheena neutraloinnin jälkeen vettä haihdutettiin näytteestä uunissa (70 °C) kolme päivää. Tämän jälkeen haihdutusta jatkettiin tyhjiöhaiduttimella.

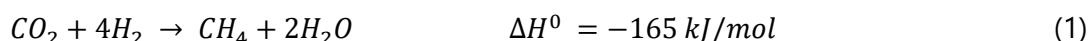
### Biokaasuntuotanto happoprosessin jäännöksestä

Happoprosessin jälkeen käytetyssä raaka-aineessa on edelleen jäljellä metaanintuottopotentiaalia, joka vuoksi happoprosessin kiinteästä jäännöksestä tehtiin metaanintuottopotentiaali-kokeet. Tutkittavia massoja kokeessa oli neljä: fermentoitu massa ilman tuhkaa (A1), massaa, johon lisättiin 0,1 (A2) ja 0,5 (A3) g/VS tuhkaa sekä käsittelemätön biojäte (BW). Koe suoritettiin kolmena rinnakkaisena käsittelynä automaattisen laitteiston avulla (Bioprocess Control Ab, Ruotsi). Koe toteutettiin 500 ml lasipulloissa, joihin kaikkiin lisättiin 375 g mikrobiymppeä. Näytteen ja mikrobiympin orgaanisen kuiva-aineen suhde oli fermentoiduilla massoilla 0,5 ja käsittelemättömällä biojätteellä 0,3. Pullot täytettiin ionivaihdetulla vedellä 400 g kokonaisuutensa. Lämpötila kokeessa oli  $37 \pm 1$  °C. Näyteseosten pH mitattiin ennen ja jälkeen kokeen. Pulloihin lisättiin pH:n puskuroimiseksi natriumbikarbonaattia (NaHCO<sub>3</sub>) annostuksella 3 g/l. Pulloissa muodostuva biokaasu johdettiin CO<sub>2</sub>-sitoutusyksikköön, jossa biokaasun sisältämä hiilidioksidi reagoi natriumhydroksidin kanssa. Metaani johdettiin edelleen kaasun tilavuusmittaukseen, joka perustuu nesteensyrjäytykseen. Ennen kokeen alkua pullojen kaasutila ja letkulinjat huuhdeltiin typpikaasulla, jotta olosuhteet saatiin hapettomiksi. Ymppeinä käytettiin Envor Forssan biokaasureaktorin reaktorilietettä, josta poistettiin karkea materiaali 2\*2 mm siivilällä ennen käyttöä.

### Vedyn in situ -metanointi

Vedyn biologiseen metanointiin käytettiin CSTR (continuously stirred tank reactor) reaktoria. Kokeessa käytettiin kahta reaktoria, joista toiseen lisättiin pelkkää biojätettä ja toiseen biojätettä sekä vedyn ja hiilidioksidin seoskaasua.

Biokaasuprosessin välivaiheena syntyy orgaanisten happojen lisäksi myös vetyä, joka normaali prosessissa kuluu metanogeenien tuottaessa siitä metaania. Vedyn in situ -metanointi perustuu tähän prosessivaiheeseen, eli prosessissa on jo vetyä hyödyntäviä metanogeenijä. Vedyn metanointi perustuu Sabatieren reaktioon (1)



Tässä hankkeessa biokaasureattoriin syötettiin vedyn ja hiilidioksidin seosta, seossuhteella 2:1 ja 4:1 (H<sub>2</sub>:CO<sub>2</sub>). Sekoituskaasun syöttömäärä määritettiin 8 tuntia syötön jälkeen tuotetun hiilidioksidin pohjalta, niin että vetyä syötettiin suhteessa 2:1 H<sub>2</sub>:CO<sub>2</sub>. Reaktorien havaittiin tuottavan 50 % koko päivän kaasuista ensimmäisen 8 tunnin aikana syötön jälkeen. Yleisen kaasu- ja turvallisuuden lisäksi vedyn syöttö päätettiin rajoittaa tälle suurimman kaasuntuoton ajalle. Ymppeä adaptoitettiin puhtaalla vetykaasulla ennen varsinaisen kokeen aloitusta.

## **Liite 2. Hydrometallurgisen prosessin menetelmät**

### **Laboratoriokokeet**

Hydrometallurgisen prosessin kehitys aloitettiin laboratoriomittakaavan liuotuskokeilla. Aluksi liuottimena käytettiin etaanihappoa eli etikkaa, koska se oli todettu Luken suorittamissa kokeissa anaerobisessa prosessissa tuotetun happoseoksen pääkomponentiksi. Kokeissa selvitettiin puhtaan etaanihapon suorituskykyä murskattujen magneettien liuotuksessa. Kokeissa vaihdeltiin etaanihapon väkevyyttä, kiinteän aineen ja liuottimen suhdetta sekä liuotusaikaa ja -lämpötilaa. Etaanihapon lisäksi kokeissa käytettiin osaa anaerobisella käymisellä tuotetun happoseoksen eri komponenteista sekä niiden synteettisiä seoksia.

Liuotuskokeiden lisäksi kokeissa selvitettiin metallien talteenottoa liuoksesta. Ensiksi kehitettiin raudan erottamista liuoksesta käyttäen hapettavaa saostamista. Liuokseen syötettiin ilmaa, jolloin ilman happi reagoi raudan kanssa muodostaen rauta(III)oksidihydroksidia,  $\text{FeO}(\text{OH})$ , joka saostuu liuoksesta. Kokeissa määritettiin reaktioajan, lämpötilan ja pH:n vaikutusta saostumistehokkuuteen.

Toiseksi selvitettiin harvinaisten maametallien talteenottoa liuoksesta, missä hyödynnettiin vakiintunutta oksaalihapposaostusta. Tässä menetelmässä liuokseen lisätään oksaalihappoa, joka muodostaa harvinaisten maametallien ionien kanssa veteen liukenemattomia suoloja  $\text{REE}_2(\text{C}_2\text{O}_4)_3$ . Harvinaisten maametallien oksalaattisuolat voidaan muuntaa edelleen niiden oksideiksi,  $\text{REE}_2\text{O}_3$ , kuumentamalla riittävän korkeassa lämpötilassa.

### **Pilot-kokeet**

Pilot-kokeissa selvitettiin metallien talteenotto-prosessin skaalattavuutta. Kokeiden perustana toimi laboratoriomittakaavan etikkahappoliuotuskokeissa hyväksi havaitut parametrit. Pilot-kokeissa optimoitiin samoja kolmea prosessivaihetta kuin laboratoriomittakaavassakin, eli liuotusta, raudan erottamista ja harvinaisten maametallien talteenottoa. Pilot-kokeet suoritettiin Jyväskylän yliopiston bench scale –laboratoriossa ja pilotointia varten liuostilavuuksia kasvatettiin laboratoriomittakaavan noin desilitrasta kolmeen litraan.



### Liite 3. Kannattavuuslaskennan materiaalit ja menetelmät

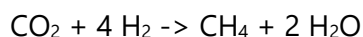
AD I mädätteen ominaisuudet (Taulukko 8) laskettiin sillä oletuksella, että 30 % biojätteen sisältämästä orgaanisesta aineesta hajoaa AD I -prosessin aikana. Tämä on enemmän kuin mitä BMP-vähenemän avulla voisi päätellä. Tämä perusteltiin sillä, että AD I -prosessin voi olettaa toimivan esikäsitteilyä AD II -prosessille, jolloin jäljelle jäänyt orgaaninen aines hajoaa tehokammin kuin mitä se olisi hajonnut yksivaiheisessa prosessissa.

**Taulukko 8.** Biojätteen ja kaksivaiheisen AD-prosessin ensimmäisen vaiheen (AD I) mädätteen ominaisuudet.

| -               | Biojäte | Selite         | ADI mädäte | Selite         |
|-----------------|---------|----------------|------------|----------------|
| massa (t/vko)   | 273     | lähtöarvo      | 233        | laskennallinen |
| TS (%)          | 35,1    | analysoitu     | 28,6       | analysoitu     |
| TS (t)          | 95,9    | laskennallinen | 66,6       | laskennallinen |
| VS (%)          | 33,4    | analysoitu     | 27,4       | analysoitu     |
| VS (t)          | 91,2    | laskennallinen | 63,8       | laskennallinen |
| VS / TS         | 0,95    | laskennallinen | 0,96       | laskennallinen |
| BMP (Nml/gVS)   | 682     | analysoitu     | 584        | analysoitu     |
| Tot-N (g/kg tp) | 9,84    | analysoitu     | 11,55      | laskennallinen |
| Tot-N (kg)      | 2687    | laskennallinen | 2687       | ei muutu       |
| NH4-N (g/kg tp) | 0,33    | analysoitu     | 2,40       | laskennallinen |
| NH4-N (kg)      | 90      | laskennallinen | 558        | laskennallinen |
| Tot-P (g/kg tp) | 1,00    | arvioitu       | 1,17       | laskennallinen |
| Tot-P (kg)      | 273     | laskennallinen | 273        | ei muutu       |

Happoprosessin kemikaalikulutus laskettiin seuraavaksi. Ensin laskettiin 10 g/l etikkahappoliuoksen pH (pH 2,8), mikä vastaa perkolaationesteen happoseoksen väkevyttä. Tämän jälkeen laskettiin paljonko soodaa (NaHCO<sub>3</sub>) liuokseen tulee lisätä pH:n neutraloimiseksi (0,14 kg/m<sup>3</sup>). Lopuksi laskettiin, paljonko rikkihappoa tarvitaan alkuperäisen pH:n palauttamiseksi (0,10 dm<sup>3</sup> 93 % H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/m<sup>3</sup>).

AD II -prosessin lisäksi myös AD I -prosessissa syntyy jonkin verran metaania (65 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/vko), sekä lisäksi vetyä (761 m<sup>3</sup> H<sub>2</sub>/vko) ja hiilidioksidia (CO<sub>2</sub>). Kaasuseos johdetaan AD II -reaktoriin, jossa myös vety ja hiilidioksidi reagoivat metaaniksi. Tämän lisäksi vetyä saadaan vielä myös metallinerotusprosessista, joka sekin johdetaan AD II -reaktoriin. Metallinerotusprosessi, jonka kapasiteetti on 2 000 kg magneettijätettä viikossa, tuottaa 156 m<sup>3</sup> H<sub>2</sub>/vko. Biomeetaanin saanto metallinerotusprosessista saatavasta vetykaasusta laskettiin seuraavasti. Vedystä 90 % oletettiin reagoivan metaaniksi seuraavan reaktioyhtälön mukaisesti:



Lisäksi oletettiin, että saatavilla on riittävästi hiilidioksidia.

#### Vaihtoehto A: Biometaania liikennekäyttöön yksivaiheisella AD-prosessilla

Vaihtoehtoon A laitostyyppiä valittiin puolikuivamädätys siitä huolimatta, että syötteen kuiva-ainepitoisuus oli korkea (35 %). Valinta johtui siitä, että kaksivaiheisen AD-prosessin jälkimmäinen vaihe toteutetaan puolikuivamädätyksellä ja prosessien kaasuntuotto oli näin

paremmin verrattavissa toisiinsa. Puolikuivamädätyksessä mädätettä separoidaan ja neste-jaetta kierrätetään takaisin prosessiin, mutta prosessi vaatii lisäksi laimennusvettä, jota oletettiin olevan saatavilla esim. alueen muista prosesseista. Laimennusvedellä syötteen kuiva-ainepitoisuus lasketaan 35 % -> 20 %, minkä jälkeen edelleen nestejaetta kierrättämällä syötteen kuiva-ainepitoisuudeksi saadaan 15 %. Osa prosessissa syntyvästä biokaasusta käytettiin lämmöntuotantoon, jolla katettiin laitoksen lämmöntarve. Laitoksen tarvitsema sähkö ostettiin verkosta. Tuotetusta biokaasusta jalostettiin biometaania liikennekäyttöön, joka myytiin omalta tankkausasemalta.

#### Syötteen:

Biojäte: 14 200 t/vuosi

Vesi (harmaavesi): 10 700 m<sup>3</sup>/vuosi

Laitoskuvaus:

Laitostyyppi: puolikuivamädätys, separoidun nestejakeen kierrätys

Reaktorin prosessitilavuus: 3 800 m<sup>3</sup>

Syötteen kuiva-ainepitoisuus: 20 %

Viipymä: 35 vrk

Laitokseen sisältyy:

- Lietesäiliö laimennusveden vastaanottoon: hyötytilavuus 1 030 m<sup>3</sup> (35 vrk:n syöte)
- Katettu kiinteän syötteen varasto biojätteelle: hyötytilavuus 2 720 m<sup>3</sup> (35 vrk:n syöte)
- Kiinteän syötteen murskaus- ja syöttölaite
- Hygienisointiyksikkö
- Lämpökattila
- Biometaanin jalostin
- Tankkausasema
- Mädätteen separointi ruuvipuristimella
- Lietesäiliö separoinnin nestejakeelle: hyötytilavuus 9 630 m<sup>3</sup> (6 kk:n mädäte)
- Katettu varasto separoinnin kuivajakeelle: hyötytilavuus 2 140 m<sup>3</sup> (6 kk:n mädäte)

#### Lopputuote:

Biometaani liikennekäyttöön 1 152 312 kg/vuosi

Kannattavuuslaskennassa ei huomioitu biojätteen vastaanotosta aiheutuvia kustannuksia eikä toisaalta myöskään biojätteen käsittelystä saatavaa porttimaksua, koska tavoitteena oli verrata vaihtoehtoisia lopputuotteita (biometaani ja/tai happoseos) keskenään. Myöskään käsittelyjäännöksen separoidun neste- ja kuivajakeen lannoitekäytöstä saatavaa tuloa ei huomioitu, koska tulon (n. 1 €/kg liukoisia ravinteita peltoon levitettynä) oletettiin olevan samaa suuruusluokkaa kuljetus- ja levityskustannusten kanssa (Horn ym. 2020). Näin ollen vaihtoehdossa A saatiin tuloa ainoastaan biometaanin myynnistä liikennekäyttöön omalta tankkausasemalta.

## **Vaihtoehto B: Etikkahappoa ja biometaania kaksivaiheisella AD-prosessilla**

Vaihtoehdossa B toteutettiin kaksivaiheinen AD-prosessi. Ensimmäinen vaihe (AD I) toteutettiin kuivamädätyksellä, jossa lopputuotteena saatiin perkolaationesteeseen liuenneita lyhytketjuisia karboksyylihappoja sekä mädätettä, jolla oli edelleen korkea biokemiallinen metaanintuottopotentiaali (BMP) (Taulukko 1). Toinen vaihe (AD II) toteutettiin puolikuivamädätyksellä. Toisen vaiheen biokaasusta jalostettiin biometaania liikennepolttoaineeksi sekä lisäksi tuotettiin lämpökattilassa lämpöä molempiin prosessivaiheisiin (AD I ja AD II). Molempien laitojen tarvitsema sähkö ostettiin verkosta.

Kiinteän syötteen murskaus- ja syöttö reaktoriin on merkittävä kustannustekijä. Vaihtoehdossa B oletetaan, että biojätettä voi käyttää sellaisenaan ilman murskausta kuivamädätyksessä (AD I). Vasta kuivamädätyksen mädänte murskataan ennen käyttöä raaka-aineena puolikuivamädätyksessä (AD II). Vastaavasti ensimmäisen vaiheen (AD I) syötettä ei hygienisoida vaan hygienisointi tehdään vasta toisen vaiheen (AD II) yhteydessä.

### AD I, syötteen:

Biojäte: 14 200 t/vuosi

AD I, laitokuvaus:

Laitostyyppi: kuivamädätys

Reaktorisiilojen lkm: 2

Yhden reaktorisiilon tilavuus: 680 m<sup>3</sup>

Syötteen kuiva-ainepitoisuus: 35 %

Viipymä: 7 vrk

Laitokseen sisältyy:

- Katettu kiinteän syötteen varasto biojätteelle: hyötytilavuus 2 720 m<sup>3</sup> (35 vrk:n syöte)
- Reaktorisiilot (2 kpl), pohjalla hihnakuljetin automaattiseen täyttöön ja purkuun
- Erytysuuri perkolaationestesäiliö: hyötytilavuus 2 340 m<sup>3</sup>

VFA:n erotus, syötteen:

Perkolaationeste: 780 m<sup>3</sup>/vko, happokonsentraatio 10 g/l etikkahapolle

Kemikaalit: sooda 113 kg/vko, rikkihappo (93 %) 78 l/vko

VFA:n erotus, prosessokuvaus:

Prosessivaiheet:

- perkolaationesteen separointi dekantterilingolla
- separoidun nestejakeen (pH 2,8) neutralointi soodalla
- veden poisto haihduttamalla
- rikkihapon lisäys haihdutusjäännökseen
- etikkahapon erotus tislamalla

Laitteet ja säiliöt:

- dekantterilinko
- säiliö nestejakeelle (3 900 m<sup>3</sup> / 35 vrk)
- haihdutin
- säiliö tislatulle etikkahapolle (115 m<sup>3</sup> / 35 vrk)

Lopputuotteet:

Konsentroidu happoseos 23 m<sup>3</sup>/vko, happokonsentraatio 60 g/l etikkahapolle

Mädäte 233 t/vko (AD I mädäte, Taulukko 1)

AD II, syötteen:

AD I mädäte: 12 100 t/vuosi

Vesi (harmaavesi): 5 200 m<sup>3</sup>/vuosi (vähimmäistarve)

AD I poistokaasu: 6 375 kg CH<sub>4</sub>/vuosi, 39 600 m<sup>3</sup> H<sub>2</sub>/vuosi

Metallinerotuksen poistokaasu: 8 100 m<sup>3</sup> H<sub>2</sub>/vuosi

AD II, laitoskuvaus:

Laitostyyppi: puolikuivamädätys, separoidun nestejakeen kierrätys

Reaktorin prosessitilavuus: 2 650 m<sup>3</sup>

Syötteen kuiva-ainepitoisuus: 20 %

Viipymä: 35 vrk

Laitokseen sisältyy:

- Lietesäiliö laimennusveden vastaanottoon: hyötytilavuus 3 900 m<sup>3</sup> (35 vrk:n syöte)
- Katettu kiinteän syötteen varasto biojätteelle: hyötytilavuus 2 320 m<sup>3</sup> (35 vrk:n syöte)
- Kiinteän syötteen murskaus- ja syöttölaite
- Hygienisointiyksikkö
- Lämpökattila
- Biometaanin jalostin
- Tankkausasema
- Mädätteen separointi ruuvipuristimella
- Lietesäiliö separoinnin nestejakeelle: hyötytilavuus 6 860 m<sup>3</sup> (6 kk:n mädäte)
- Katettu varasto separoinnin kuivajakeelle: hyötytilavuus 1 530 m<sup>3</sup> (6 kk:n mädäte)

Lopputuote:

Biometaani liikennekäyttöön yht. 600 066 kg/vuosi

(josta 8 795 kg AD I -prosessista ja 1 307 kg metallinerotuksesta saatavasta vedystä)

Vaihtoehdossa B saatiin tuloa sekä teollisuuden tuotetusta happoseoksesta että biometaanin myynnistä liikennekäyttöön omalta tankkausasemalta. Happoseosta, jossa oletettiin olevan etikkahappoa 60 g/l, tuotettiin 23 m<sup>3</sup> viikossa. Kun hapon määrä arvioidaan 80 %:n liuoksen mukaan vastaa se 89 700 kg/vuosi. Suurin osa biometaanista syntyy ensimmäisen vaiheen (AD I) mädätteestä, mutta pieni osa myös AD I -prosessin poistokaasun sisältämästä biometaanista ja vedystä sekä metallinerotusprosessin poistokaasun sisältämästä vedystä.

**Taulukko 9.** Kannattavuuslaskennassa käytettyjä hintatietoja.

| -  | Hinta                 | Viite  |
|--|-----------------------|--|
| Sähkö  | 8,74 snt/kWh, alv 0 % | Yritysassiakas, vuosikulutus<br>2 000 – 19 999 MWh<br>(keskiarvohinta 2022)    |
| Urakointihinta sotun kanssa                    | 25,60 €/h             | Palva 2019   |
| Kiinteän syötteen lastaus                      | 2,31 €/kg tp          | laskettu vastaavasti kuin<br>Luostarinen ym. 2023                              |
| Biometaanin liikennepolttoaineeksi             | 1,37 €/kg, alv 0 %    | Gasum, 17.7.2023   |
| Natriumvetykarbonaatti,<br>25 kg:n säkki       | 2,37 €/kg, alv 0 %    | ESSKA.fi, 11.8.2023  |
| Rikkihappo, 93 % liuos,<br>850 l kontti        | 0,95 €/l, alv 0 %     | suprokem.fi, 11.8.2023   |
| Etikkahappo, 80 % liuos, IBC<br>kontti 1050 kg | 2,50 €/kg, alv 0 %    | laspek.com, 25.8.2023  |
| Kiinteiden syötteiden murskauslaite            | 85 825 €              | laskettu vastaavasti kuin<br>Luostarinen ym. 2023                              |
| Pohjakuljetin kuivamädätyslaitokseen           | 100 000 €             | oma hinta-arvio  |
| Dekantterilinko                                | 91 000 €              | hinta-arvio käsittelykapasiteettia 25 m <sup>3</sup> /h vastaavalle laitteelle |
| Haihdutin                                      | 550 000 €             | hinta-arvio haihdutuskapasiteettia 2090 kg/h vastaavalle laitteelle            |

**Taulukko 10.** Vaihtoehdon A investointihinnat, lähtötietona Biokaasulaskuri (Luke 2022), lu-  
kuun ottamatta Taulukossa 9 erikseen mainittuja hintatietoja.

| <b>Investointikustannus</b>   | <b>Hinta (€)</b> |
|---|------------------|
| Lietesyöttösäiliö (1 030 m <sup>3</sup> /35 vrk)                        | 55 500           |
| Lietesyöttösäiliön sekoitin ja pumppu                                   | 16 500           |
| Katettu kiinteiden syötteiden varasto<br>(2 720 m <sup>3</sup> /35 vrk) | 259 800          |
| Kiinteän syötteen murskaus- ja syöttölaite                              | 85 825           |
| Reaktorin rakenteet (sis. pohjalaatat)                                  | 480 700          |
| Reaktorin sekoitin/sekoittimet  | 69 700           |
| Muu prosessitekniikka   | 56 000           |
| Muut rakenteet (tekniset tilat, putket, kondenssikaivot)                | 53 800           |
| Lämpökattila  | 67 800           |
| Boileri, putkitukset ja automaatioliitännät                             | 46 000           |
| Yllä mainittujen asennustyöt & käyttöönotto                             | 120 100          |
| Projektisuunnittelu, työjohto ja luvat                                  | 44 000           |
| Soihtu  | 10 000           |
| Muut (toimittajan rahoituskulut, matkakulut, rahti)                     | 25 700           |
| Syötteen laimennus käsittelyjäännöksen nestejakeella                    | 50 000           |
| Jalostin + paineistus 250 bariin (sis. asennus)                         | 943 900          |
| Tankkausasema jalostimen yhteydessä (sis. asennus)                      | 150 000          |
| Maatyöt   | 187 200          |
| Sähköliityntä verkkoon  | 69 200           |
| Hygienisointiyksikkö (28 400 m <sup>3</sup> )                           | 252 700          |
| Katettu varasto kuivajakeelle (2 140 m <sup>3</sup> /6 kk)              | 204 059          |
| Lietesäiliö nestejakeelle (9 630 m <sup>3</sup> /6 kk)                  | 519 665          |
| <b>Yhteensä</b>   | <b>3 768 149</b> |

**Taulukko 11.** Vaihtoehdon A investointikustannus, tuotot, kustannukset ja kannattavuus.

| <b>Investointi</b>   |           |       |       |       | <b>€</b>         |
|--|-----------|-------|-------|-------|------------------|
| <b>yht.</b>  |           |       |       |       | <b>3 768 149</b> |
| Tuki   |           |       | 25    | %     |                  |
| Tuettu investointi   |           |       |       |       | 2 826 112        |
| Laskentakorko  |           |       | 5     | %     |                  |
| Annuiteetti  |           |       |       |       | 287 609          |
| <b>TUOTOT</b>  |           |       |       |       |                  |
| Biometaani   | 1 152 312 | kg/v  | 1,37  | €/kg  | 1 578 667        |
| <b>yht.</b>  |           |       |       |       | <b>1 578 667</b> |
| <b>KÄYTTÖ-<br/>KUSTANNUKSET</b>  |           |       |       |       |                  |
| Kiinteän syötteen las-<br>taus   | 14 200    | t/v   | 2,31  | €/t   | 32 745           |
| Ostosähkö  | 1 351 335 | kWh/v | 0,087 | €/kWh | 115 528          |
| Ylläpito-, huolto- ja<br>korjauskustannukset<br>(1,5 % investointihin-<br>nasta) |           |       |       |       | 56 522           |
| Päivittäinen työ<br>(0,5 h/vrk)  | 182,5     | h/v   | 25,80 | €/h   | 4 709            |
| Hallinnollinen työ   |           |       |       |       | 4 000            |
| Vakuutus (0,5 % inves-<br>tointihinnasta)  |           |       |       |       | 18 841           |
| <b>yht.</b>  |           |       |       |       | <b>232 345</b>   |
| KATE   |           |       |       |       |                  |
| tuotot - käyttökustan-<br>nukset   |           |       |       |       | 1 346 322        |
| <b>TULOS</b>   |           |       |       |       |                  |
| kate – investoinnin an-<br>nuiteetti   |           |       |       |       | 1 058 713        |
| <b>TAKAISINMAKSUAIKA</b>   |           |       |       |       |                  |
| tuettu investointi / kate  |           |       |       |       | 2,1              |

**Taulukko 12.** Vaihtoehtoon B investointihinnat, lähtötietona Biokaasulaskuri (Luke 2022), lukuun ottamatta Taulukossa 9 erikseen mainittuja hintatietoja.

| <b>Investointikustannus</b>  | <b>Hinta (€)</b> |
|--|------------------|
| <b>AD I (kuivamädätys):</b>  |                  |
| Katettu kiinteiden syötteiden varasto (2 720 m <sup>3</sup> /35 vrk) | 259 800          |
| Reaktorit (2 kpl), suotonestesäiliö, kaasuväkä ja maatyöt            | 464 500          |
| Perkolaationestesäiliön lisäkapasiteetti                             | 126 333          |
| Prosessitekniikka (sis. putkistot, sähkö ja automaatio)              | 107 200          |
| Yllä mainitun tekniikan asennukset                                   | 71 500           |
| Hihnakuuljetin reaktorisiilon pohjalle                               | 100 000          |
| Suunnittelu ja luvat   | 94 500           |
| <b>Hapon puhdistus ja konsentrointi:</b>                             |                  |
| Dekantterilinko  | 91 000           |
| Säiliö nestejakeelle (3 900 m <sup>3</sup> /35 vrk)                  | 210 554          |
| Haihdutin  | 550 000          |
| Säiliö tislattulle happoseokselle (115 m <sup>3</sup> /35 vrk)       | 6 209            |
| <b>AD II (puolikuivamädätys):</b>                                    |                  |
| Lietesyöttösäiliö  | 43 600           |
| Lietesyöttösäiliön sekoitin ja pumppu                                | 16 500           |
| Katettu kiinteiden syötteiden varasto                                | 256 700          |
| Kiinteän syötteen murskaus- ja syöttölaite                           | 79 092           |
| Reaktorin rakenteet (sis. pohjalaatat)                               | 358 400          |
| Reaktorin sekoitin/sekoittimet                                       | 50 600           |
| Muu prosessitekniikka  | 56 000           |
| Muut rakenteet (tekniset tilat, putket, kondenssikäivöt)             | 49 000           |
| Lämpökattila   | 49 000           |
| Boileri, putkitukset ja automaatioliitännät                          | 46 000           |
| Yllä mainittujen asennustyöt & käyttöönotto                          | 105 200          |
| Projektsuunnittelu, työjohto ja luvat                                | 44 000           |
| Soihku   | 10 000           |
| Muut (toimittajan rahoituskulut, matkakulut, rahti)                  | 24 200           |
| Syötteen laimennus käsittelyjäännöksen nestejakeella                 | 50 000           |
| Jalostin + paineistus 250 bariin (sis. asennus)                      | 539 300          |
| Tankkausasema jalostimen yhteydessä (sis. asennus)                   | 150 000          |
| Maatyöt  | 142 700          |
| Sähköliityntä verkkoon   | 54 900           |
| Hygienisointiyksikkö (28 400 m <sup>3</sup> )                        | 252 700          |
| Katettu väkä kuivajakeelle (1 525 m <sup>3</sup> /6 kk)              | 145 484          |
| Lietesäiliö nestejakeelle (6 864 m <sup>3</sup> /6 kk)               | 370 576          |
| <b>Yhteensä</b>  | <b>4 975 548</b> |



**Taulukko 13.** Vaihtoehdon B investointikustannus, tuotot, kustannukset ja kannattavuus.

| Investointi  |           |       |       |       | €                |
|--|-----------|-------|-------|-------|------------------|
| <b>yht.</b>  |           |       |       |       | <b>4 975 548</b> |
| Tuki   |           |       | 30    | %     |                  |
| Tuettu investointi   |           |       |       |       | 3 482 884        |
| Laskentakorko  |           |       | 5     | %     |                  |
| Annuiteetti  |           |       |       |       | 352 903          |
| <b>TUOTOT</b>  |           |       |       |       |                  |
| AcOH (80 %)  | 89 700    | kg/v  | 2,50  | €/kg  | 224 250          |
| Biometaani AD I  | 8 795     | kg/v  | 1,37  | €/kg  | 12 049           |
| Biometaani AD II   | 589 964   | kg/v  |       |       | 808 251          |
| <b>yht.</b>  |           |       |       |       | <b>4 975 548</b> |
| <b>KÄYTTÖ-<br/>KUSTANNUKSET</b>  |           |       |       |       |                  |
| Kiinteän syötteen las-<br>taus (AD I)  | 14 200    | t/v   | 2,31  | €/t   | 32 745           |
| Kiinteän syötteen las-<br>taus (AD II)   | 12 0990   | t/v   | 2,31  | €/t   | 27 901           |
| Ostosähkö (AD I)   | 77 760    | kWh/v | 0,087 | €/kWh | 6 799            |
| Ostosähkö (hapon kon-<br>sentrointi)   | 1 581 840 | kWh/v |       |       | 138 305          |
| Ostosähkö (AD II)  | 751 941   | kWh/v |       |       | 65 744           |
| Ylläpito-, huolto- ja<br>korjauskustannukset<br>(1,5 % investointihin-<br>nasta) |           |       |       |       | 74 633           |
| Päivittäinen työ<br>(1 h/vrk)  | 365       | h/v   | 25,80 | €/h   | 9 417            |
| Hallinnollinen työ   |           |       |       |       | 4 000            |
| Vakuutus (0,5 % inves-<br>tointihinnasta)  |           |       |       |       | 24 878           |
| <b>yht.</b>  |           |       |       |       | <b>402 215</b>   |
| KATE   |           |       |       |       |                  |
| tuotot - käyttökustan-<br>nukset   |           |       |       |       | 644 126          |
| <b>TULOS</b>   |           |       |       |       |                  |
| kate – investoinnin an-<br>nuiteetti   |           |       |       |       | 291 223          |
| <b>TAKAISINMAKSUAIKA</b>   |           |       |       |       |                  |
| tuettu investointi / kate  |           |       |       |       | 5,4              |



**Löydät meidät  
verkosta**

**luke.fi**

