

Timo Loiva

# KESKITETTY BIOKAASUN TUOTANTO JA RAVINNEKIERRÄTYS MAATALOUS- YMPÄRISTÖSSÄ

Kandidaatintyö  
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Tarkastaja: Marika Kokko  
Tarkastaja: Jukka Rintala  
Toukokuu 2021

# TIIVISTELMÄ

Timo Loiva: Keskitetty biokaasun tuotanto ja ravinnekierätys maatalousympäristössä  
Centralized biogas production and nutrient recycling in agricultural environment  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Tekniikan ja luonnontieteiden TkK-tutkinto-ohjelma, ympäristö- ja energiatekniikka  
Toukokuu 2021

---

Kasvihuonepäästöjen vähentämiseksi kehitystä tarvitaan kaikilla aloilla, ja biokaasun tuotanto on yksi tehokas keino päästöjen vähentämiseksi erityisesti maatalouden osalta. Biokaasua tuotetaan laajasti niin Suomessa kuin maailmallakin, mutta esimerkiksi Suomen nykyisestä noin 1 TWh biokaasun vuosituotannosta olisi teknistaloudellista kasvupotentiaalia lähes kymmenkertaiseksi. Biokaasua syntyy orgaanisen aineksen hajotessa biokaasulaitoksen reaktorissa anaerobisissa olosuhteissa. Monivaiheisen hajoamisprosessin tuotteena saadaan metaania ja hiilidioksidia sisältävää biokaasua sekä mädätysjäännöstä.

Tutkimuksen kohteena oli suuren mittakaavan keskitetyt yhteismädätyslaitokset, jotka käsittelevät kiinteitä sekä lietemäisiä orgaanisia jäte- ja sivuvirtoja useista lähteistä. Käsiteltäviä syötteitä ovat muun muassa eläinten lannat, kasvitähteet sekä teollisuuden ja yhdyskuntien biojätteet ja lietteet. Keskitetyillä biokaasulaitoksilla on tärkeä rooli jätteiden käsittelijänä sekä energian ja ravinteiden kierrättäjänä, ja niiden ympärille voidaan rakentaa kiertotalouteen perustuvaa paikallisten toimijoiden yhteistyötä. Tässä kirjallisuuskatsauksessa tutkittiin ravinnekierätystä keskitetyillä biokaasulaitoksilla ottamalla selvää mädätysjäännöksen ravinnepitoisuuksista ja ravinteiden käytökelpoisuudesta kasveille, mädätysjäännöksen teknisistä prosessointimahdollisuuksista sekä biokaasulaitoksen ravinnekierätyksen taloudellisista näkökulmista.

Jäte- ja sivuvirroista tuotetuilla kierrätyslannoitteilla voidaan korvata teollisesti tuotettuja mineraalilannoitteiden käyttöä. Biokaasulaitosten mädätysjäännöstä voidaan käyttää kierrätyslannoitteena peltokäytössä sellaisenaan tai siitä voidaan jatkojalostaa erilaisia kierrätyslannoitevalmisteita. Kierrätyslannoitteita käytettäessä on kiinnitettävä erityistä huomiota lannoituksen suunnitteluun, jotta kasvien ravinnetarpeet tulevat täytetyksi ilman ylimääräistä ravinnekuormitusta ympäristöön.

Biokaasuprosessien massa- ja ravinnetaseiden tarkastelussa havaittiin, että biokaasuprosessi parantaa syötteiden mukana tulevan typen käyttökelpoisuutta kasveille, kun orgaaniseen aineeseen sitoutunutta typpeä liukoistuu ammoniumtypeksi. Ammoniumtypen osuus kasvaa syötteestä riippuen noin 30–50 %, kun taas muut ravinteet eivät juuri muutu biokaasuprosessissa. Suuren mittakaavan biokaasulaitoksessa mädätysjäännöksestä erotetaan mekaanisessa vedenerotuksessa fosforipitoinen kuivajae ja typpipitoinen nestejae. Niitä voidaan käyttää sellaisenaan kierrätyslannoitteina tai jatkojalostaa useilla eri tekniikoilla ravinnepitoisuuden nostamiseksi. Erityisesti nestejajetta voi olla järkevää jatkojalostaa väkevämmäksi sen korkean vesipitoisuuden takia.

Mädätysjäännöksen ravinteiden kierrätyksen taloudellisessa tarkastelussa kaksi tärkeintä muuttujaa ovat logistiikan kustannukset ja lannoitetuotteiden prosessoinnin kustannukset. Prosessointiin liittyy merkittäviä investointi- ja käyttökustannuksia (energia, kemikaalit, kunnossapito, työ), mutta sen avulla saadaan laskettua lannoitteen kuljetus- ja varastointikustannuksia huomattavasti. Siispä kannattava kuljetusmatka kasvaa, kun mädätysjäännöksestä prosessoidaan väkevempiä ravinnetuotteita. Suuren mittakaavan laitoksen etuna on mahdollisuus investoida ravinnetuotteiden jatkojalostukseen, jolloin tuotteita voidaan myydä kannattavasti kauemmaksikin. Jatkojalostuksen kannattavuutta ja jalostusmenetelmän valintaa tulee tarkastella tapauskohtaisesti, sillä niihin vaikuttavat muun muassa lähialueiden peltojen ravinnetilanne ja prosessoinnilla saavutettavat lisähyödyt kuten prosessiveden kierrätys ja ylijäämäenergian hyödyntäminen.

Avainsanat: biokaasu, ravinnekierätys, kierrätyslannoite, mädätysjäännös

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# SISÄLLYSLUETTELO

1.JOHDANTO.....	1
2.BIOKAASUN TUOTANTO.....	3
2.1 Anaerobinen hajoaminen.....	3
2.2 Biokaasulaitoksen toiminta .....	5
2.3 Biokaasun tuotanto Suomessa .....	7
3.KESKITETTY BIOKAASULAITOS .....	9
3.1 Keskitetyn biokaasulaitoksen toimintamalli.....	9
3.2 Käsiteltävät biomassat.....	10
3.3 Keskitetyt biokaasulaitokset – kansainvälisiä esimerkkejä .....	11
4.RAVINTEIDEN KIERRÄTYS BIOKAASULAITOKSEN YHTEYDESSÄ .....	13
4.1 Mädätysjäännöksen ravinnepitoisuudet.....	13
4.2 Mädätysjäännöksen mekaaninen vedenerotus .....	14
4.3 Neste- ja kuivajakeen jatkojalostusmenetelmiä .....	16
4.4 Kierrätyslannoitteiden käyttökelpoisuus kasveille.....	19
4.5 Ravinnekierrätyksen taloudellisia näkökulmia .....	22
5.JOHTOPÄÄTÖKSET .....	25
LÄHTEET.....	27

# 1. JOHDANTO

Ilmastonmuutoksen hidastamiseen haetaan nopeita ja tehokkaita ratkaisuja, ja kasvihuonepäästöjen vähentämiseksi on säädetty merkittäviä tavoitteita. Euroopan vihreän kehityksen ohjelma (Euroopan komissio 2019) linjaa tavoitteeksi 50–55 % päästövähennyksen vuoden 1990 kasvihuonekaasujen päästötasosta vuoteen 2030 mennessä ja hiilineutraaliuden vuoteen 2050 mennessä. Marinin hallituksen ohjelmassa Suomi pyrkii maailman ensimmäiseksi fossiilivapaaksi hyvinvointiyhteiskunnaksi ja tavoittelee hiilineutraaliutta jo vuoteen 2035 mennessä (Hallitusohjelma 2019). Maatalous, yhdyskunnat ja teollisuus tuottavat suuret määrät orgaanisia jätteitä ja sivuvirtoja, joista voidaan biokaasulaitoksilla tuottaa metaania ja hiilidioksidia sisältävää biokaasua. Biokaasu on uusiutuva energianlähde, jolla voidaan korvata fossiilisia polttoaineita liikenteessä, teollisuudessa ja energiantuotannossa. Samalla biokaasun tuotanto on viisas tapa käsitellä orgaanisia jätteitä ja saada hallintaan niistä syntyvät hajuhaitat, metaani- ( $\text{CH}_4$ ) ja dityppioksidipäästöt ( $\text{N}_2\text{O}$ ) sekä ravinnekuormitus ympäristöön.

Maataloudessa viljelykasvien lannoituksessa käytettävät ravinteet ovat ajankohtainen aihe, sillä maailman kasvava väkiluku lisää niiden kysyntää, ja toisaalta synteettisesti tuotettujen mineraalilannoitteiden tuotanto on resurssi-intensiivistä ja aiheuttaa merkittävästi kuormitusta ympäristölle. Suurin osa typpilannoitteista tuotetaan energiaintensiivillä ja merkittävästi hiilidioksidipäästöjä aiheuttavalla Haber-Bosch-menetelmällä, jossa muodostetaan ammoniakkia ilmasta ja maakaasusta korkeassa paineessa ja lämpötilassa (Razon 2018). Fosforilannoitteita tuotetaan maaperästä louhittavasta apatiitista, jonka rajalliset varannot sijaitsevat muutamissa esiintymissä, mikä voi aiheuttaa tulevaisuudessa haasteita fosforin saatavuudessa (Marttinen et al. 2017).

Mineraalilannoitteiden käyttöä voidaan kuitenkin korvata orgaanisista jäte- ja sivuvirroista tuotetuilla kierrätyslannoitteilla, ja tässä biokaasulaitoksilla on merkittävä rooli. Suomessa muodostuvat kierrätettävät biomassat sisältävät koko lailla fosforilannoitukseen Suomessa tarvittavan määrän fosforia, joten potentiaalia biomassojen tehokkaaseen hyödyntämiseen on huomattavasti (Seppänen et al. 2019). Biokaasulaitosten mädätysjäännöksestä jalostetuilla kierrätysravinteilla on alhaisemmat elinkaari päästöt kuin mineraalilannoitteilla, joten ravinnekierrätyksellä vähennetään koko ruuantuotantoketjun päästöjä. (Horn et al. 2020) Biokaasun tuotannolla ja ravinnekierrätyksellä luodaan pai-

kallista kiertotaloutta, jossa materiaalit kiertävät eri toiminnoissa tuoden arvoa yhä uudelleen. Tätä toimintaa pyritään edistämään poliittisin keinoin Suomessa ja EU:ssa (Hallitusohjelma 2019; Ravinteiden kierrätyksen toimenpideohjelma 2019).

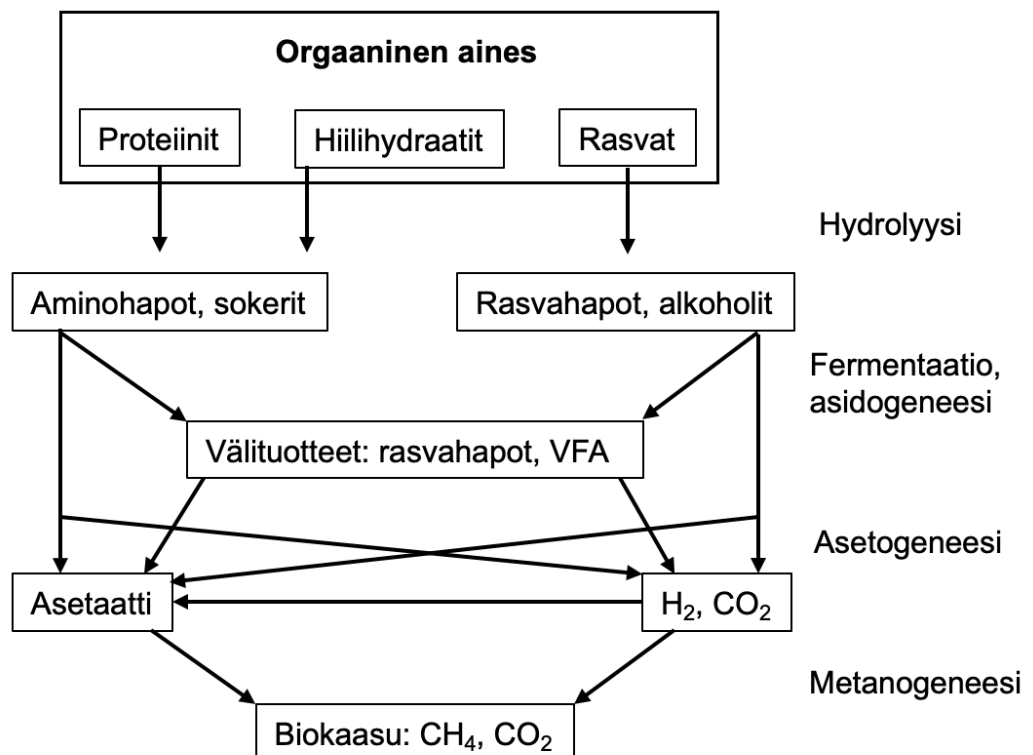
Tutkimuksen aiheena on keskitetty biokaasun tuotanto ja ravinnekierrätys. Tässä konseptissa käsitellään maatalouden teollisuuden ja yhdyskuntien biomassoja keskitetyllä biokaasulaitoksella biokaasuksi, ja jäljelle jäänyttä mädätysjäännöstä hyödynnetään peltokäytössä sellaisenaan tai jatkojalostettuina lannoitetuotteina. Tutkimuksessa keskitytään maatalousympäristössä toimiviin keskitettyihin laitoksiin, joissa syötteitä tulee useammasta lähteestä ja laitoksen tuotteet palvelevat useita toimijoita. Tutkimuksen tavoitteena on vertailla eri tapoja kierrättää ravinteita maatalousympäristöön sijoittuvalla keskitetyllä biokaasulaitoksella ja löytää ravinteiden hyötykäytön sekä taloudellisen kannattavuuden näkökulmasta viisas tapa kierrättää ravinteita tällaisessa konseptissa. Tavoitteeseen päästään ottamalla selvää ravinteiden käyttäytymisestä biokaasuprosessissa, mädätysjäännöksen ravinnepitoisuuksista sekä erilaisista menetelmistä mädätysjäännöksen jatkojalostukseen. Ravinteiden tarkastelussa keskitytään typpeen ja fosforiin. Maatalouden näkökulmasta tarkastellaan kierrätysravinteiden soveltuvuutta viljelykasveille. Taloudellisessa tarkastelussa selvitetään ravinteiden kierrätykseen liittyviä kustannuksia ja vertaillaan eri teknologioita kannattavuuden näkökulmasta.

Luvussa 2 käsitellään biokaasun tuotannon teoreettista taustaa ja biokaasulaitoksen toimintaa sekä lyhyesti biokaasualan nykytilaa Suomessa. Luvussa 3 käydään läpi keskitetyn biokaasulaitosten toimintamallia sekä niissä käsiteltäviä syötteitä, ja otetaan esille pari esimerkkiä maailmalta niihin liittyen. Luku 4 keskittyy ravinteiden kierrätykseen esitellen menetelmiä kierrätyslannoitteiden tuottamiseen biokaasulaitoksella, ja teknologioiden lisäksi tarkastellaan kierrätyslannoitteiden käyttökelpoisuutta kasveille sekä ravinnekierrätyksen kannattavuuteen vaikuttavia tekijöitä. Johtopäätöksissä kerrataan, mitä tutkimuksesta opittiin ja tehdään päätelmiä opitun pohjalta.

## 2. BIOKAASUN TUOTANTO

### 2.1 Anaerobinen hajoaminen

Biokaasun tuotanto perustuu luonnossa tapahtuviin mikrobiologisiin prosesseihin, joita on valjastettu teolliseen tuotantoon. Luonnossa anaerobista hajoamista tapahtuu, kun mikrobit hajottavat hapettomissa olosuhteissa orgaanista ainetta, esimerkiksi kuolleita kasvien osia. Anaerobinen hajoaminen on monivaiheinen mikrobiologinen prosessi, jonka eri vaiheissa erilaiset mikrobit pilkkovat orgaanisia yhdisteitä toisiksi, ja hajotusketjun lopussa tuotteena on biokaasua (kuva 1). Biokaasun pääkomponentit ovat metaani ja hiilidioksidi, ja se sisältää myös muun muassa rikkivetyä, jonka osuus riippuu raaka-aineiden ominaisuuksista (Murphy & Tamsiroj 2013).



**Kuva 1.** Anaerobisen hajoamisen vaiheet (mukailen lähteestä Kymäläinen 2015)

Orgaaninen aines koostuu hiilihydraateista, rasvoista ja proteiineista. Anaerobisen hajoamisen ensimmäisessä vaiheessa, hydrolyysissä, nämä monimutkaiset orgaaniset yhdisteet pilkkoutuvat pienemmiksi, liukoiksi molekyyleiksi (Murphy & Tamsiroj 2013). Yhdisteet ovat aluksi liian suuria mikrobien ravinnoksi, ja siksi mikrobit erittävät solun ulkopuolelle hiilihydraatteja, proteiineja ja rasvoja pilkkovia entsyymejä, joiden avulla ne

pystyvät hyödyntämään aineita ravintonaan. Hiilihydraattien, proteiinien ja rasvojen pilkkomiseen on omat entsyyminsä, ja hajotustuotteina saadaan tietynlaisia molekyyliä. Osa mikrobeista ovat erikoistuneet hajottamaan tiettyjä yhdisteitä, toiset pystyvät erittämään useita eri yhdisteitä pilkkovia entsyymejä. (Schnürer & Jarvis 2009) Hiilihydraatteja on monenlaisia: monimutkaisia ja ketjuttuneita polysakkarideja kuten selluloosaa, hemiselluloosaa, tärkkelystä, pektiiniä ja glykogeeniä (Schnürer & Jarvis 2009), ja mukana voi olla myös monosakkarideja, lyhytketjuisia sokereita, joita ei tarvitse pilkkoa (Kymäläinen 2015). Polysakkaridit pilkkoutuvat entsyymien avulla monosakkarideiksi, joita ovat esimerkiksi glukoosi, ksyloosi, mannoosi ja arabinoosi. Erityisesti eläinperäiset biomassat sisältävät runsaasti proteiineja, jotka pilkkoutuvat hydrolyysissä aminohapoiksi. Biomassoissa on myös rasvoja, jotka koostuvat yleisesti glyserolista ja rasvahapoista, ja hydrolyysissä entsyymit pilkkovat rasvat takaisin näiksi molekyyliksi. (Schnürer & Jarvis 2009)

Fermentaatio, toiselta nimeltään asidogeneesi, on anaerobisen hajoamisketjun toinen vaihe, jossa fermentoivat bakteerit käyttävät hydrolyysin tuotteita kuten sokereita, aminohappoja ja alkoholeja ravintonaan ja muuttavat niitä toisiksi yhdisteiksi. Fermentaatioissa on aktiivisena samoja bakteereita kuin hydrolyysissä, mutta myös muita bakteerityyppejä. (Schnürer & Jarvis 2009) Fermentaatiotuotteina saadaan erilaisia orgaanisia happoja (VFA, volatile fatty acids), alkoholeja ja ammoniakkia (aminohapoista) sekä hiilidioksidia ja vetyä. Fermentaation lopputuotteet riippuvat raaka-aineen koostumuksesta ja prosessin olosuhteista sekä läsnä olevasta mikrobipopulaatiosta. (Kymäläinen 2015)

Kolmantena vaiheena on anaerobinen hapetus, jota kutsutaan myös asetogeneesiksi. Tässä vaiheessa monimutkaiset fermentaatiotuotteet muuttuvat metaanin muodostumisen raaka-aineiksi: vedyksi, hiilidioksidiksi ja asetaatiksi. (Kymäläinen 2015) Asetogeneesi-vaiheen mikrobit ovat läheisessä yhteistyössä seuraavan vaiheen mikrobien kanssa, sillä siinä missä asetogeeniset mikrobit tuottavat vetyä, täytyy metanogeenisten mikrobien käyttää vetyä tasapainon ylläpitämiseksi (Schnürer & Jarvis 2009).

Anaerobisen hajoamisen viimeisenä vaiheena on metaanin muodostuminen, metanogeneesi, jossa metanogeenit muodostavat biokaasua eli metaania ja hiilidioksidia edellisten vaiheiden tuotteista, hiilidioksidista, asetaatista ja vedystä. Metanogeneesissä tärkeässä roolissa ovat asetotrofit, jotka käyttävät asetaattia ravintonaan tuottaen metaania ja hiilidioksidia. Toinen tärkeä mikrobiryhmä on hydrogenotrofit, jotka muodostavat metaania ensisijaisesti vedystä ja hiilidioksidista. (Schnürer & Jarvis 2009)

Anaerobisessa hajoamisessa syötteen massaa siirtyy biokaasuun, ja jäljelle jää hajomatonta mädätysjännöstä, joka sisältää hajomatonta orgaanista ainesta, ravinteita ja

vettä. Syötteen kuiva-ainepitoisuudesta (TS, Total Solids) orgaanisen aineen osuus (VS, volatile solids) määrittää teoreettisen maksimin biokaasun saannolle (Latvala 2009). Marttisen et al. (2015b) mukaan syötteen massasta noin 5–6 % muodosti biokaasua, ja loppu massasta päätyi mädätysjäännökseen.

## 2.2 Biokaasulaitoksen toiminta

Biokaasulaitoksen peruseriaate on kaikissa laitoksissa sama, mutta prosessin suunnittelussa on tehtävä useita valintoja. Biokaasulaitoksen laitostyyppin määrittävät raaka-aineen syöttötekniikka, syötteen kuiva-ainepitoisuus, reaktorin lämpötila, sekoitusjärjestelmä, ja että toteutetaanko prosessi yksi- vai kaksivaiheisena. Tärkeimmät teknologiset vaihtoehdot on esitetty taulukossa 1. Valinnoissa on otettava huomioon laitoksen mitta-kaava ja käsiteltävien biomassojen ominaisuudet sekä paikalliset olosuhteet. (Bachmann 2013)

Taulukko 1. *Biokaasuprosessin teknologiset vaihtoehdot*

Teknologia	Muuttuja	Vaihtoehdot
Raaka-aineen syöttö	Reaktorityyppi ja syötteen kuiva-ainepitoisuus	- panosreaktorissa kertasyöttö - jatkuva tai puolijatkuva syöttö jatkuvatoimisessa reaktorissa - syöttö märkänä tai kuivana
Reaktorityyppi	Syötteen kuiva-ainepitoisuus	- jatkuvatoiminen reaktori märälle syönteelle (täyssekoitusreaktori) (TS < 13 %)ª - jatkuvatoiminen reaktori kuivalle syönteelle (tulppavirtausreaktori) (TS noin 20–40 %)ª - panosreaktori kuivalle syönteelle (TS < 50 %)ª
Reaktorin lämpötila	Patogeenien riski	- mesofiilinen (esim. 35–37 °C)ª - termofiilinen (esim. 50–55 °C)ª
Vaiheiden määrä	Raaka-aineen koostumus, happamoitumisen riski	- yksivaiheinen - kaksivaiheinen
Sekoitusjärjestelmä	Syötteen kuiva-ainepitoisuus	- mekaaniset sekoittimet kuiville syönteille - mekaaniset, hydrauliset tai paineilmakäyttöiset sekoittimet märille syönteille

Taulukon tiedot lähteistä Bachmann 2013 ja a Latvala 2009

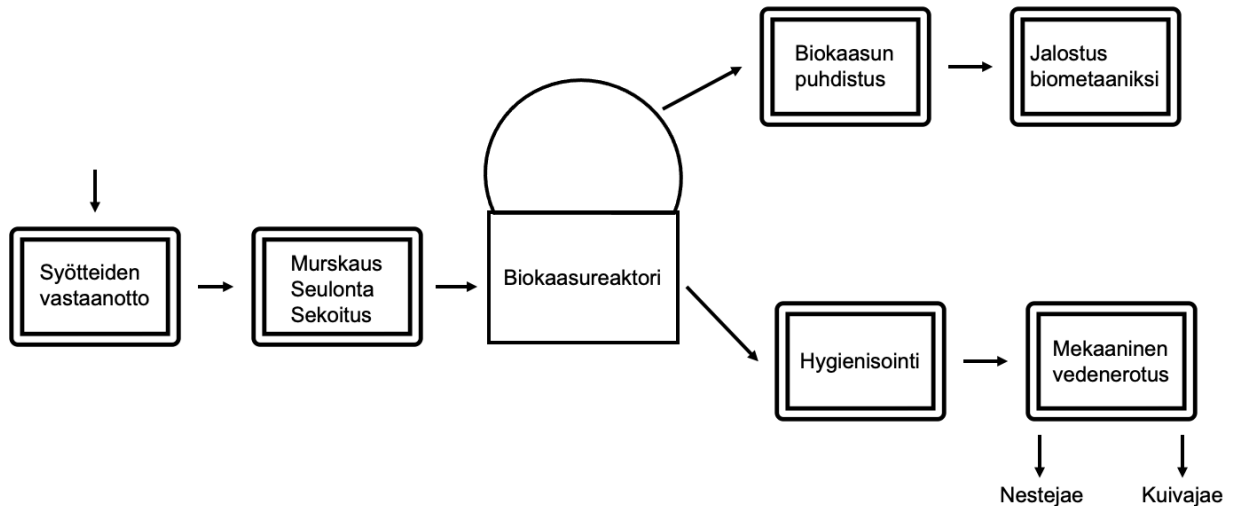
Usein biokaasulaitokselle tulevat syönteet täytyy esikäsitellä ennen reaktoriin syöttämistä prosessin häiriöttömyyden ja tehokkuuden varmistamiseksi. Mikäli laitoksella käsitellään erilaisia syönteitä, tarvitaan useampia esikäsitelymenetelmiä. Tärkeimpiä esikäsitely-



prosesseja ovat murskaus, seulonta, sakeuttaminen, liettäminen ja hygienisointi. (Latvala 2009) Murskauksella pienennetään biomassan partikkelikokoa, mikä kasvattaa biomassan saatavilla olevaa pinta-alaa ja parantaa sen liukoisuutta. Tämä tehostaa anaerobista hajoamista, sillä hajotettava biomassa on paremmin mikrobien saavutettavilla. (Schnürer & Jarvis 2009) Kiinteitä epäpuhtauksia kuten muoveja ja metalleja voidaan erottaa väljällä tai repijällä ja seulonnalla. Sakeuttamisella ja liettämisellä voidaan säätää kuiva-ainepitoisuutta biokaasuprosessiin sopivaksi, sakeuttamisessa poistamalla vettä ja liettämisessä lisäämällä vettä. (Latvala 2009) Hygienisoinnissa biomassassa esiintyviä patogeeneja tapetaan vaadittavan hygieniatason saavuttamiseksi (Schnürer & Jarvis 2009). Hygienisoinnin tarve riippuu käsiteltävistä syötteistä, ja seos käsitellään vaativamman syötteen mukaisesti. Hygienisointi toteutetaan lämmittämällä biomassa 70 °C lämpötilaan tunnin ajaksi, ja tämä voidaan tehdä biokaasuprosessia ennen tai sen jälkeen. (Latvala 2009)

Biokaasulaitoksen toiminnan kannalta syötteen merkittäviä parametreja ovat kuiva-ainepitoisuus (TS) ja orgaanisen aineen pitoisuus (VS). Näitä pystytään muokkaamaan esikäsitelyllä ja syötteiden sekoitussuhteilla, sillä eri syötteissä on erilaiset kuiva-ainepitoisuudet ja orgaanisen aineen pitoisuudet. Syöteseoksen valmistamisessa pyritään sekoittamaan syötteet niin, että kuiva-ainepitoisuus (TS) jää laitoksen valmistajan määrittämän maksimikuiva-ainepitoisuuden alapuolelle. Syötteiden sekoitussuhteisiin liittyy myös orgaanisen aineen osuuden (VS) seuranta, joka on tärkeää optimaalisen orgaanisen kuormituksen ylläpitämiseksi. Kuormitus ilmoitetaan vuorokaudessa syötettävänä orgaanisen aineen massana reaktorin nestetilavuuskuutiota kohden, ja tyypillinen arvo kuormitukselle on 3–9 kgVS/m<sup>3</sup>/d. (Latvala 2009) Prosessin toiminnan kannalta on myös tärkeää, että syötteen hiilen ja typen suhde (C:N) vastaa mikro-organismien ravintotarpeita. Liian suuri C:N voi tarkoittaa mikrobien typenpuutetta ja liian pieni C:N voi aiheuttaa ammoniakki-inhibition. (Schnürer & Jarvis 2009) Tyypillinen arvo syöteseoksen C:N-arvolle on 20:1 ja 30:1 välillä (Al Seadi et al. 2013).

Esikäsitelyn jälkeen syötteet ohjataan reaktoriin (kuva 2), jossa anaerobinen hajoaminen tapahtuu. Reaktori on varustettu syöttöjärjestelmällä, lämmityksellä ja sekoittimilla. Reaktori voi olla panostoinen kuivareaktori, jossa käsiteltävä biomassa syötetään ja poistetaan kerrallaan ja sen annetaan sen hajota reaktorissa sopivan viipymäajan verran. Jatkuvatomisessa kuivaprosessissa syöte kulkee reaktorin läpi syöttöjärjestyksessä liikkuen eteenpäin mekaanisilla kuljettimilla (tulppavirtausreaktori). Jatkuvatomisessa täyssekoitteisessa märkäprosessissa syötettä syötetään ja mädätysjäännöstä poistetaan jatkuvasti, ja reaktorin koko nestetilavuutta sekoitetaan koko ajan. (Bachmann 2013)



**Kuva 2.** Biokaasuprosessin vaiheet

Reaktorin olosuhteita on tarkkailtava jatkuvasti sopivien mädätysolosuhteiden ylläpitämiseksi. Lämpötilan tarkkailu ja tasaisena pitäminen on tärkeää stabiilin mikrobitoiminnan ylläpitämiseksi (Schnürer & Jarvis 2009). Myöskin pH-arvon seuranta on tärkeää, koska se vaihtelee orgaanisesta kuormituksesta riippuen, ja pH:n liiallinen lasku tai nousu voi johtaa biokaasun tuoton vähenemiseen ja mikrobitoiminnan häiriintymiseen ja pahimmillaan prosessin pysähtymiseen (Latvala 2009). Viipymäaika eli aika, jona koko reaktorin tilavuus vaihtuu (HRT, Hydraulic Retention Time), riippuu syötteen koostumuksesta, reaktorin tilavuudesta ja lämpötilasta sekä sekoituksesta (Schnürer & Jarvis 2009; Latvala 2009). Pitkällä viipymäajalla hajotetaan enemmän orgaanista ainetta kaasuksi, mutta samalla lämmitys- ja sekoitustarve kasvaa ja reaktorin koko on suurempi. Liian lyhyt viipymäaika sen sijaan voi aiheuttaa reaktorin ylikuormitustilan, jolloin kaasuntuotto ja orgaanisen aineen reduktio jää pieneksi. Viipymäaika optimoidaan syöttöä säätämällä, ja viipymäaika on riittävä, kun kaasuntuotto on vakaata ja orgaanisesta aineksesta hajoaa noin 50–60 %. (Latvala 2009)

Mädätysjäännöksen käsittelylle ja loppusijoitukselle on useita toimintatapoja. Ravinnetoimen mädätysjäännös pyritään hyödyntämään sellaisenaan tai käsiteltynä esimerkiksi maataloudessa, viherrakennuksessa ja maisemoinnissa (Latvala 2009). Mädätysjäännöksen koostumus määräytyy mädätysprosessin kuiva-ainepitoisuudesta: kuivaproessin mädätysjäännös on kuivalantamaista ja märkäprosessin mädätysjäännös lietemäistä (Horn et al. 2020). Mädätysjäännöksen jatkojalostusmenetelmiä käsitellään luvussa 4.

### 2.3 Biokaasun tuotanto Suomessa

Suomen ensimmäiset biokaasulaitokset rakennettiin 1960-luvulla, mutta alan kehitys ja teknologian yleistyminen Suomessa on ollut hidasta ennen 2000-lukua: ennen vuotta

2000 käytteenotettuja laitoksia on Suomessa 18 kappaletta (Winquist et al 2018). Biokaasulaitosten yleistyminen Suomessa on tapahtunut pääosin 2010-luvulla, ja vuonna 2020 biokaasua tuotti Suomessa 69 biokaasureaktorilaitosta ja 33 kaatopaikkakaasupumppaamaa. Biokaasun vuosituotanto vuonna 2019 oli noin 1 TWh, joka vastasi noin 0,5 prosenttia Suomen uusiutuvan energian tuotannosta (Virolainen-Hynnä 2020).

Vuonna 2017 biokaasua hyödynnettiin lämpönä 520,0 GWh ja sähköinä 178,4 GWh. Kuitenkin hyödynnettävyyssaste oli vain 83,5 %, ja soihutupoltolla jätettiin hyödyntämättä energiaa 121,0 GWh. Yleisin tapa hyödyntää biokaasua on polttaa sitä lämpökattilassa, ja toinen yleinen hyödyntämistapa on yhdistetty lämmön ja sähköntuotanto (CHP, combined heat and power). (Huttunen et al. 2018)

Biokaasua jatkojalostetaan biometaaniksi liikennekäyttöön. Vuonna 2017 liikennepolttoaineena käytettiin  $30,2 \pm 0,8$  GWh biokaasua (Huttunen et al. 2017). Biokaasun liikennekäyttö on kuitenkin ollut kasvussa, kuten myös kaasuautojen määrä. Vuoden 2017 lopussa kaasuautoja oli Suomen liikenteessä 3665 kun vuoden 2020 lopussa kaasuautojen määrä oli jo 13583 (Roinila 2021). Vuoteen 2030 mennessä tavoitteena on, että Suomen liikenteessä on vähintään 50 000 kaasukäyttöistä henkilö- ja 3000 pakettiautoa (Biokaasuohjelma 2020). Biokaasun liikennekäyttö on hyödyllistä niin liikenteen päästövähennystavoitteiden saavuttamisen kuin myös energiaomavaraisuuden ja huoltovarmuuden kannalta.

Biokaasun tuotantoa halutaan lisätä ja siihen on myös edellytyksiä, sillä biokaasun tuotantoon sopivia materiaalivirtoja on vielä paljon hyödyntämättömänä. Suomessa on tehty paljon tutkimusta potentiaalisista biokaasun tuotantomääristä, ja merkittävä kasvupotentiaali on erityisesti maatalouden tuottamissa biomassoissa. (Virolainen-Hynnä 2020) Tähti & Rintala (2010) mukaan Suomen teoreettinen biokaasun energiapotentiaali on 24,4 TWh. Teknistaloudelliseksi biokaasun energiapotentiaaliksi arvioidaan noin 9,2 TWh, ja arvioissa otetaan huomioon se, että kaikkea teoreettisesti olemassa olevaa materiaalia ei teknisistä ja taloudellisista syistä voida hyödyntää (Tähti & Rintala 2010).

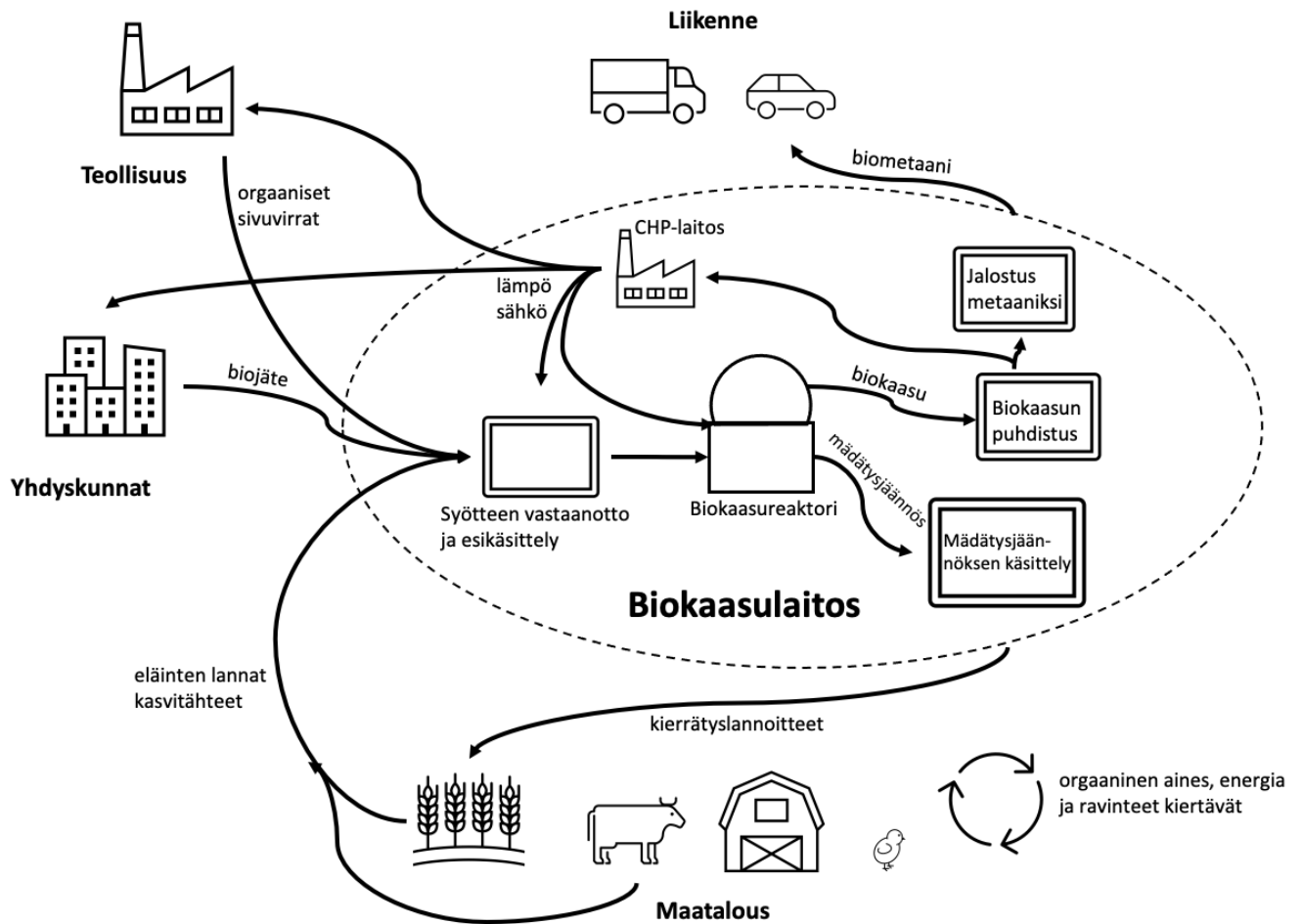
Raaka-aineita biokaasun tuotantoon on hyvin saatavilla, ja uusia laitoksiakin on perustettu tiuhaan tahtiin viime vuosina. Tuotannon kasvu vaatii tietysti myös kysyntää. Suomalaisen biokaasualan ammattilaisten arvioiden mukaan vuonna 2030 biokaasulle olisi Suomessa kysyntää vähintään 4 TWh edestä, jopa 11 TWh toisten arvioiden mukaan. Biokaasun kysynnän odotetaan kasvavan teollisuuden, lämmön- ja sähköntuotannon, laivojen, kuorma-autojen sekä bussien ja henkilöautojen polttoaineena. (Virolainen-Hynnä 2020)

## 3. KESKITETTY BIOKAASULAITOS

### 3.1 Keskitetyn biokaasulaitoksen toimintamalli

Maaseutualueiden biokaasulaitokset voidaan kokoluokkansa perusteella jakaa karkeasti maatilakohtaisiin laitoksiin, maatilojen yhteisiin laitoksiin ja keskitettyihin laitoksiin (Marttinen et al. 2015a). Tässä työssä keskitytään keskitettyihin yhteismädätyslaitoksiin maatalousympäristössä. Yhteismädätyksellä tarkoitetaan tässä työssä lietteiden ja kiinteiden biomassojen käsittelyä samassa reaktorissa.

Keskitetyt biokaasulaitokset ovat yleensä yritysten omistamia teollisen mittakaavan laitoksia, jotka käsittelevät monia biomassoja eri lähteistä (Marttinen et al. 2015a). Keskitettyjen biokaasulaitosten rooli on energiantuotannon lisäksi myös orgaanisten jätteiden käsitteleminen ja ravinteiden talteenotto hyötykäyttöä varten. Liiketoimintamallissa energian myynnin lisäksi orgaanisten jätteiden käsittelymaksut eli porttimaksut ovat usein tärkeässä roolissa. (Winquist et al. 2018) Kolmas tulonlähde on mädätysjäännöksen tai siitä prosessoitujen ravinnetuotteiden myyminen. Käyttökustannukset koostuvat raaka-ainekustannuksista, huolto- ja ylläpitokustannuksista, työvoimakustannuksista ja muista pakollisista kustannuksista (Marttinen et al. 2015a). Biokaasulaitokset rakennetaan usein suurina biomassavirtoja tuottavien toimintojen yhteyteen, ja monessa tapauksessa yritysten yhteistyö ja teollinen symbioosi ovatkin biokaasulaitoksen liiketoiminnan perustana. Kuvassa 3 on havainnollistettu keskitetyn biokaasulaitoksen toimintamallia ja siinä toteutuvia energia- ja materiaalikiertoja.



**Kuva 3.** Kiertotalous keskitetyn biokaasulaitoksen konseptissa

Koska keskitetyt biokaasulaitokset käsittelevät suuria määriä ravinnepitoisia biomassoja ja teollinen mittakaava mahdollistaa edistyneiden teknologioiden hyödyntämisen, niillä on tärkeä rooli ravinteiden kierrätyksessä. Pelkkä mädätysjäännöksen levitys lähialueiden pelloille ei välttämättä ole mahdollista, sillä ravinteiden levitykselle säädettyjä enimmäismääriä ei saa ylittää. Sen sijaan suuren mittakaavan biokaasulaitoksilla mädätysjäännöksestä voidaan jatkojalostaa ravinnetuotteita, joita voidaan kuljettaa maatalouskäyttöön kauemmaksikin (Marttinen et al. 2015a).

### 3.2 Käsiteltävät biomassat

Biokaasuprosessin syötteeksi sopivat hyvin monenlaiset kasvi- ja eläinperäiset biomassat. Lähtökohta on se, että raaka-aine hajoaa prosessiolosuhteissa. Raaka-aineiden valinta näkyy biokaasun saannossa ja koostumuksessa sekä mädätysjäännöksen ominaisuuksissa. Sopivien syötteiden valinta auttaa biokaasun tuotannon tulojen maksimoinnissa sekä hyvälaatuisen kierrätyslannoitteen tuottamisessa. (Schnürer &

Jarvis 2009) Potentiaalisia käsiteltäviä biomassoja ovat muun muassa maatalouden lietteet, jätevedenpuhdistamoiden lietteet, teollisuuden orgaaniset sivuvirrat, metsäteollisuuden sivuvirrat, kasvijätteet ja energiakasvit sekä erilliskerätty biojäte (Tähti & Rintala 2010).

Kun syötteitä otetaan eri lähteistä, syötteiden karakterisointi on erityisen tärkeää prosessin tehokkuuden kannalta (Karki et al. 2021). Toisaalta yhteismädätyksen etuna on, että sekoittamalla syötteitä sopivassa suhteessa voidaan optimoida syöteseoksen ominaisuuksia (TS, VS, C:N). Reaktorin metaanintuottoon vaikuttaa syöteseoksen koostumus. Suurin teoreettinen metaanintuotto saadaan rasvoista (1041 l/kg VS), ja proteiinien (496 l/kg VS) ja hiilihydraattien (415 l/kg VS) teoreettinen metaanintuotto on huomattavasti pienempi (Tähti & Rintala 2010). Verrattuna yhden syötteen mädätykseen, yhteismädätyksellä on onnistuttu parantamaan syötteiden biohajoavuutta, prosessin tasapainoisuutta ja mädätysjäännöksen ravintoarvoa (Angelidaki & Ellegaard 2003; Karki et al. 2021).

Yhteismädätyksessä tyypillistä on sekoittaa syöteseokseen eläinten lietelantaa kiinteämmän ja energiapitoisemman syötteen kanssa. Esimerkiksi teollisuuden orgaaniset jätteet sisältävät usein runsaasti nopeasti hajoavia aineita, ja niiden käsitteleminen on haastavaa sellaisenaan. Lietelantojen korkean vesipitoisuuden takia niillä voidaan laimentaa kuivempia syötteitä pumpattavaan ja sekoitettavaan vesipitoisuuteen. Ne omaavat myös hyvän puskurointikyvyn pH:n muutoksia vastaan, mikä suojaa prosessia happamoitumiselta. Lantojen korkea ravinnepitoisuus on tärkeää hajotusprosessien kannalta, ja toisaalta lisää mädätysjäännöksen ravinnesisältöä. (Angelidaki & Ellegaard 2003)

Biokaasun tuotantoon sopivat syötteet ovat usein vesipitoisuudeltaan korkeita ja energiasältö massayksikköä kohden jää usein pieneksi. Käsiteltäviä syötteitä ei usein kannata kuljettaa kovin kaukaa, sillä kuljetuskustannukset täytyy pitää kohtuullisina. Sitran (2007) selvityksen mukaan kannattavat kuljetusmatkat biokaasulaitokselle ovat maatalouslietteiden osalta noin 25 km ja teollisuuden sekä yhdyskuntien lietteiden tapauksessa 150–250 km. Logistiikan suunnittelu ja koordinointi on keskitetyllä biokaasulaitoksella tärkeää, sillä huomioon on otettava käytössä oleva käsittely- ja varastointikapasiteetti (Sitra 2007).

### **3.3 Keskitetyt biokaasulaitokset – kansainvälisiä esimerkkejä**

Biokaasuala kehittyi nopeasti maailmalla ja toisissa maissa laitoksia on jo hyvin paljon. Otetaan tässä luvussa esille kaksi maata, jotka ovat hyviä esimerkkejä keskitetyn biokaasun tuotannon kehittämisestä. Tanska on hyvä esimerkki biokaasun tuottajamaana,

koska siellä on paljon maataloutta pienellä pinta-alalla. Meren ympäröimänä siellä on myös suuri riski ravinteiden huuhtoutumiselle mereen, joten ravinteiden kierrätys ja hallinta on tärkeää. Kiina taas on hyvä esimerkki suuresta maasta, joka tuottaa valtavasti maatalouden biomassoja, mutta jossa biokaasun tuotantokapasiteettia tarvittaisiin paljon lisää biomassojen energia- ja ravinnepotentiaalin hyödyntämiseksi tehokkaasti.

Tanskassa on sitouduttu biokaasualan kehittämiseen, ja biokaasu on osana Tanskan fossiilivapaan energian strategiaa vuoteen 2050 mennessä. Biokaasun tuotantomäärät ovat olleet kovassa kasvussa 2010-luvulla ja on teknisesti mahdollista, että Tanskan maakaasun kulutus voitaisiin korvata biokaasulla ja muilla uusiutuvilla kaasupolttoaineilla vuoteen 2035 mennessä. Eroa Suomen biokaasusektoriin on erityisesti se, että Tanskassa on ruvettu syöttämään biokaasusta jalostettua biometaania maakaasuverkkoon. Vuonna 2018 jo 11 % kaasuverkon kaasusta oli peräisin biokaasun tuotannosta, pääosin keskitetyiltä yhteismädätyslaitoksilta. Suuret keskitetyt laitokset mahdollistavat investointeja myös ravinnekierrätyksen edistämiseen, ja useilla Tanskan biokaasulaitoksilla onkin käytössä kierrätysravinteiden jatkojalostusmenetelmiä, esimerkiksi typen strippausta. Eräässä uudessa teknologiassa biokaasun epäpuhtauksista, ammoniakista ja rikkivedystä, tuotettiin ammoniumtiosulfaattilannoitetta. (Innovative waste & biogas solutions 2019)

Kiinassa on valtavat määrät maataloudesta ja ruuantuotannosta syntyviä biomassoja, joita ei hyödynnetä käsittelykapasiteetin puutteen vuoksi (Chen & Liu 2017). On yleistä, että olkia poltetaan ottamatta lämpöä hyötykäyttöön (Jiang et al. 2011). Polttamalla hukataan biomassojen energia- ja ravinnepotentiaali, ja lisäksi poltosta aiheutuu ilmakehään kasvihuonepäästöjä. Samoin Kiinassa myös merkittäviä määriä eläinten lantaa jää käsittelemättä asianmukaisesti, aiheuttaen uhkaa maan-, veden- ja ilmanlaadulle maaseudulla. (Jiang et al. 2011) Kiinassa on kannustettu ja tuettu aktiivisesti sekä kotitalousmittakaavan mädätysjärjestelmiä että keskitettyjä biokaasulaitoksia, ja vuonna 2014 Kiinassa olikin yli 40 miljoonaa kotitalousmittakaavan mädätysjärjestelmää ja yli 30 000 suuren ja keskisuuren mittakaavan biokaasulaitosta. Viime vuosina Kiinassa on alettu edistää suuremman mittakaavan keskitettyjä biokaasulaitoksia. Suuremman mittakaavan laitoksilla voitaisiin tuottaa kaupallisia kierrätyslannoitteita, mikä edistäisi ravinteiden kiertoa merkittävästi. (Chen & Liu 2017)

## 4. RAVINTEIDEN KIERRÄTYS BIOKAASULAITOKSEN YHTEYDESSÄ

### 4.1 Mädätysjäännöksen ravinnepitoisuudet

Biokaasulaitoksen syötteiden sisältämät ravinteet siirtyvät biokaasuprosessissa mädätysjäännökseen (Barambouti et al. 2020). Biokaasuprosessissa ravinteiden kokonaismäärät pysyvät prosessissa vakiona, mutta ammoniumtyypen osuuden arvioidaan kasvavan 30–50 % (Marttinen et al. 2015b). Ammoniumtyypen osuus kasvaa biokaasuprosessissa, kun syötteiden monimutkaisiin orgaanisiin yhdisteisiin sitoutunutta typpeä liukoistuu ammoniumtypeksi (Möller & Müller 2012). Fosfori, kalium ja muut kasvien käyttämät ravinteet eivät muunnu biokaasuprosessissa merkittävästi (Barambouti et al. 2020; Horn et al. 2020). Koska ravinteet päätyvät mädätysjäännökseen, analysoimalla syötteiden ravinnepitoisuuksia voidaan siis arvioida mädätysjäännöksen ravinnepitoisuuksia, ja myös toisin päin. Erilaisia syötteitä käyttämällä mädätysjäännökseen päätyy hyvin erilaisia ravinnepitoisuuksia (taulukko 2).

Taulukko 2. *Mädätysjäännöksen ravinnepitoisuuksia eri syötteillä*

Syöte	TS (%)	Kokonaistyyppi (kg/t FM)	Ammoniumtyyppi (kg/t FM)	Kokonaisfosfori (kg/t FM)
Teurasjäte <sup>a</sup>	6,1	7,9	5,3	0,9
Säilörehu + kotitalouksien biojäte <sup>a</sup>	5,9	5,3	3,3	0,4
Tislausjäte + viljakasvit <sup>a</sup>	3,7	5,9	3,7	0,7
Sian lietelanta +HVP-nurmi <sup>b</sup>	6,4	6,4	3,8	1,3
Sian lietelanta + lietelannan kuivajae <sup>b</sup>	5,6	5,7	4,3	2,1
Sian lietelanta + elintarviketeollisuuden sivutuotteet <sup>b</sup>	4,8	5,6	4,6	1,3

a Abubaker et al. 2012, b Marttinen et al. 2015b, FM = tuorepaino (fresh matter)

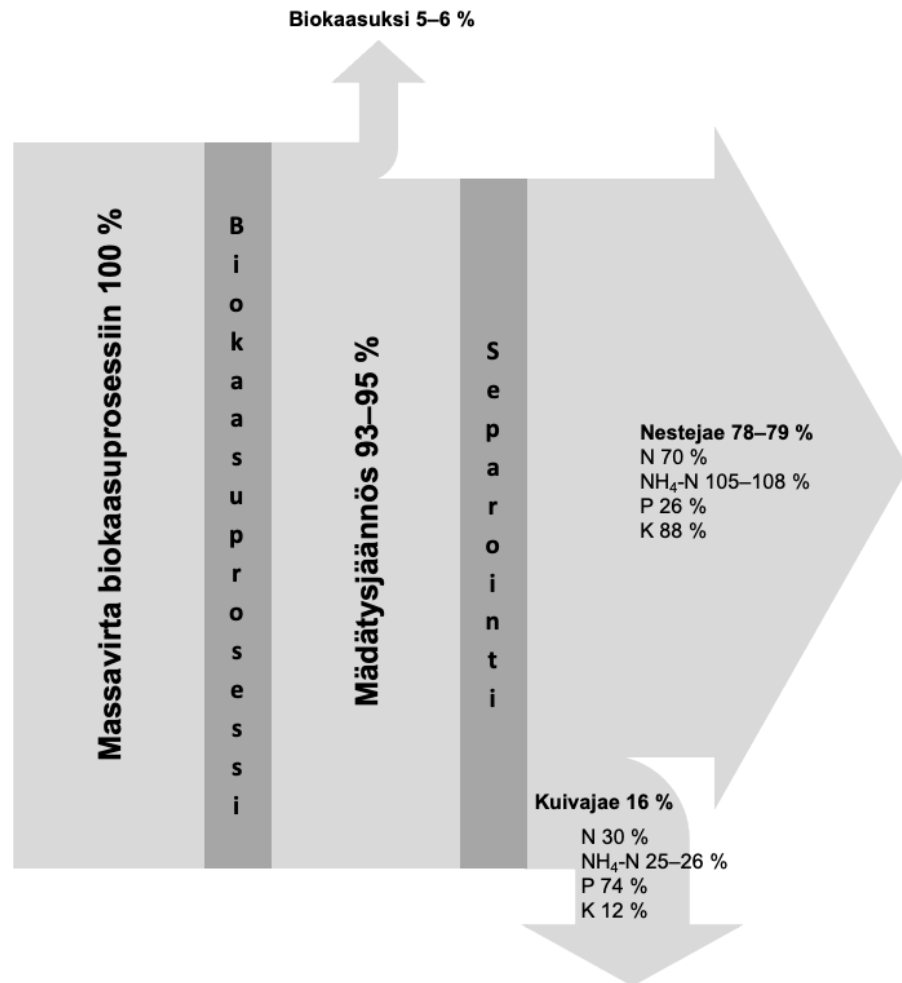
Lantojen käsittelystä syntyvissä mädätysjäännöksissä havaitaan korkeita pitoisuuksia fosforia ja typpeä, ja niissä tyypestä merkittävä osuus on ammoniumtyppeä (taulukko 2). Myös teurasjätteessä ravinnepitoisuudet ovat korkeat. Säilörehu ja kotitalouksien biojäte sekä tislausjäte ja viljakasvit biokaasulaitoksen syötteinä tuottavat vähemmän ravinnepitoista mädätysjäännöstä, mikä johtunee niiden hiilihydraattipitoisesta koostumuksesta. Hiilihydraattipitoisissa syötteissä massa koostuu pääosin hiiliketjuista, kun taas proteiinipitoisissa syötteissä hiiliketjuissa on mukana typpeä sisältäviä aminoryhmiä (Schnürer & Jarvis 2009).



## 4.2 Määtysjäännöksen mekaaninen vedenerotus

Tyypillisesti ensimmäinen vaihe määtysjäännöksen käsittelyssä on mekaaninen vedenerotus eli separointi, jossa määtysjäännöksestä erotetaan neste- ja kuiva jae (Möller & Müller 2012). Tuloksena on kaksi erilaiset ominaisuudet omaavaa massavirtaa, joita voidaan hyödyntää sellaisenaan tai jatkojalostaa erilaisiksi lannoitevalmisteiksi ja maanparannusaineiksi (Tambone et al. 2017). Teknisiä ratkaisuja mekaaniseen vedenerotukseen ovat muun muassa lingot, suotonauhapuristimet ja ruuvipuristimet. Kuivaustekniikan valintaan vaikuttaa kuivatettavan lietteen laatu ja määrä, laitteiston investointi- ja käyttökustannukset, tavoiteltava lietteen kuiva-ainepitoisuus ja rejektiveden kiintoainepitoisuus sekä erotusaste. Lingoilla ja suotonauhapuristimilla voidaan saavuttaa 15–30 % kiintoainepitoisuus ja ruuvipuristimilla 20–40 % kiintoainepitoisuus. (Lohiniva et al. 2001)

Marttinen et al. (2015b) tutkivat massa- ja ravinnetaseita biokaasuprosessissa ja neste- ja kuivajakeen erotuksessa laskennallisesti. Tulokset perustuvat syötteiden ominaisuuksien kirjallisuusarvoihin ja asiantuntijoiden arvioihin sekä separaattorin (sähkötoiminen linko) erotustehokkuuksiin. Kaikissa kolmessa biokaasuketjussa pääsyöte oli sian lietelanta (16 000 t/a), jonka kanssa käsiteltiin eri biokaasuketjuissa 3500 t/a lietelannan kuivajakeeta, HVP-nurmea tai elintarviketeollisuuden sivutuotteita. Määtysjäännöksen mekaanisessa vedenerotuksessa suurin osa tyypeistä menee nestejakeeseen, kun taas fosforista valtaosa päätyy kuivajakeeseen (kuva 4). Tutkimuksen kolmessa biokaasuketjussa ravinteiden pitoisuuksissa prosessin eri vaiheissa ei ollut merkittäviä eroja, sillä pääraaka-aine oli kaikissa sama. (Marttinen et al. 2015b)

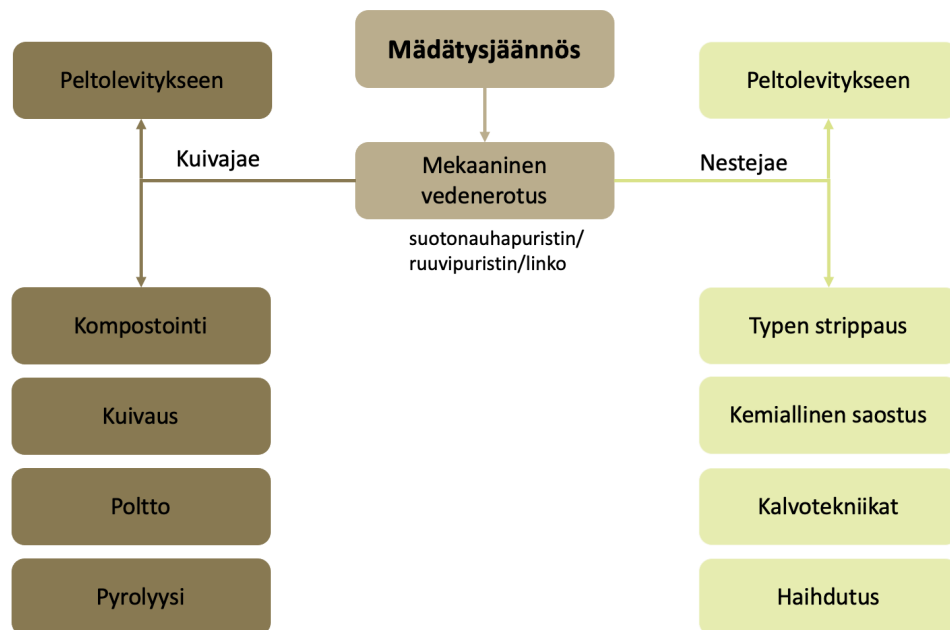


**Kuva 4.** Massan ja ravinteiden jakautuminen mädätysjäännöksen mekaanisessa vedenerotuksessa (mukaillen lähteestä Marttinen et al. 2015b)

Tambonen et al. (2017) tutkimuksessa tarkasteltiin mädätysjäännöksen ravinteiden jakautumista neste- ja kuivajakeisiin analysoimalla mädätysjäännöksen, nestejakeen ja kuivajakeen ominaisuuksia 13:lla täyden mittakaavan biokaasulaitoksella. Vedenerotus oli kaikissa laitoksissa toteutettu ruuvipuristimella. Nestejakeen kuiva-ainepitoisuudet olivat eri laitoksilla noin 3,3–6,2 %, ja kuivajakeen kuiva-ainepitoisuudet asettuivat noin 16–28 % prosenttien välille. Tyypestä suurin osa meni nestejakeisiin, joiden keskimääräinen kokonaistyyppipitoisuus oli keskimäärin noin 10 % kuiva-aineesta, kuivajakeen kokonaistyyppipitoisuuden ollessa keskimäärin noin 29 % kuiva-aineesta. Nestejakeissa ammoniumtyypin osuus kokonaistypestä oli keskimäärin 60 %. Kokonaisfosforin pitoisuudet kuiva-aineesta eivät muuttuneet vedenerotuksessa kovin merkittävästi, sillä neste- ja kuivajakeiden kokonaisfosforipitoisuudet kuiva-aineesta olivat melko lähellä mädätysjäännöksen fosforipitoisuutta. Suurin osa fosforista päätyi kuitenkin kuivajakeeseen, sillä sen kuiva-ainepitoisuus on moninkertainen nestejakeen kuiva-ainepitoisuuteen verrattuna. (Tambone et al. 2017)

### 4.3 Neste- ja kuivajakeen jatkojalostusmenetelmiä

Kun neste- ja kuivajae on eroteltu, niitä on mahdollista jatkojalostaa väkevämmiksi lannoitetuotteiksi, joissa ravinnesisältö mahtuu pienempään tilavuuteen ja massaan. Näin saadaan kannattavaa kuljetusmatkaa pidemmäksi ja varastointi- ja levityskustannuksia pienemmäksi. Väkevöintiä voidaan tehdä poistamalla vettä ja joissain tekniikoissa myös orgaanista ainesta. Jalostamalla neste- ja kuivajakeita pidemmälle voidaan saada lannoitetuotteen koostumusta normalisoitua, mikä helpottaa lannoituksen suunnittelua (Horn et al. 2020). Nestejakeesta pystytään erottelemaan haluttu yhdiste hyötykäyttöön. Neste- ja kuivajakeiden jatkojalostusmenetelmiä on useita (kuva 5), ja suuri osa tekniikoista on vielä tutkimusvaiheessa (Beckinghausen et al. 2020; Horn et al. 2020). Mädätysjäännöksen hyödyntämismuutoksia on useita, mutta tässä tutkielmassa keskitytään niihin jalostusmenetelmiin, joiden tuotteet soveltuvat lannoitteiksi tai maanparannusaineiksi peltokäyttöön.



**Kuva 5.** Mädätysjäännöksen neste- ja kuivajakeen käsittelymenetelmiä (mukaillen lähteestä Barampouti et al. 2020)

Nestejae voidaan levittää pelloille ravinteeksi sellaisenaan, jatkojalostaa väkevämmäksi ravinnetuotteeksi eri tekniikoiden avulla, tai joissain tapauksissa palauttaa prosessin alkuun laimennusvetenä (Horn et al. 2020). Nestejakeen typpipitoisuus voi olla kuitenkin liian suuri laimennusvesikäyttöön, sillä liika typpi voi aiheuttaa inhibitiota mädätysprosessissa (Tampio et al. 2016). Käsittelemättömän nestejakeen vesipitoisuus on suuri, joten sitä ei kannata viedä kovin kauas lannoitekäyttöön. Nestejakeessa on merkittävä määrä

ammoniumtyyppiä (Tambone et al. 2017), ja useimmat nestejakeen jatkojalostusmenetelmät keskittyvätkin juuri ammoniumtyypen erottelemiseen (Beckinghausen et al. 2020). Seuraavaksi tarkastellaan muutamaa nestejakeen jatkojalostusmenetelmää.

Tyyppiä voidaan erottaa nestejakeesta strippaamalla, missä ammoniumtyyppiä erotetaan nesteestä lämpötilan noston, pH:n säätämisen ja ilmapuhalluksen avulla (Horn et al. 2020) Ilmastrippauksessa lämmitetty syöte, jonka pH:ta on nostettu, ohjataan strippauskolonniin. Täytemateriaalilla täytetyn kolonnin alaosasta puhalletaan paineistettua ilmaa, ja ammoniakki siirtyy nesteestä strippauskaasuun. Kaasun mukana ammoniakki siirtyy rikkihappopesuriin, jossa se muodostaa ammoniumsulfaattia ((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) reagoiessaan rikkihapon (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) kanssa (Drosg et al. 2015). Ammoniumsulfaatin lisäksi strippauksesta jää jäljelle laimea strippausjäännöstä, joka sisältää muun muassa fosforia ja reagoimatonta tyyppiä (Horn et al. 2020) Strippaus on energiaintensiivinen prosessi, jossa kuluu huomattavasti lämpöä ja sähköä, ja lämpötila nosto parantaa tyypin talteenottotehokkuutta (Tao & Ukwuani 2015). Esimerkiksi 100 000 t/a biokaasulaitoksen nestejakeen strippauksessa kuluu Marttinen et al. (2015b) mukaan 3425 MWh lämpöä ja 361 MWh sähköä. Strippauksen lämpötilaksi on useissa lähteissä käytetty arvoa 80°C (Marttinen et al. 2015b; Tampio et al. 2016).

Kaasun läpäisevään kalvoon perustuva tekniikka (Gas-permeable membrane) on energiankulutuksen kannalta hyvä vaihtoehto, sillä sen energiankulutus voi olla jopa 18 kertaa pienempi kuin strippauksessa (Beckinghausen et al. 2020; Dube et al. 2016). Tekniikalla voidaan erottaa mädätysjäännöksen nestejakeesta kaasumaista ammoniakkia puoliläpäisevän kalvon avulla ja liuottaa se happoliuokseen toisella puolella kalvoa (Dube et al. 2016). Kun nestejakeen pH:ta nostetaan, ammoniumtyyppiä (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) muodostuu kaasumaista ammoniakkia (NH<sub>3</sub>), joka pääsee kalvon läpi. Kalvon toisella puolella ammoniakki reagoi rikkihapon (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) kanssa muodostaen ammoniumsulfaattia ((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Reaktio hapon kanssa poistaa ammoniakkia permeaatista, ja siksi konsentraatioero pyrkii työntämään ammoniakkia kalvon läpi jatkuvasti. (Kaljunen 2018) PH:n nosto voidaan tehdä lisäämällä emäksiä tai ilmastamalla, joista ilmastus on Dube et al. (2016) mukaan huomattavasti edullisempi ja nopeampi menetelmä. Kaasun läpäisevän kalvon menetelmällä saadaan nesteen ammoniumtyyppiä eroteltua jopa 99 %, ja tuote hyvin puhdasta ammoniumsulfaattia (Dube et al. 2016).

Haihdutuksessa nestejakeesta haihdutetaan vesihöyryä lämmön avulla ja tuotteena saadaan korkeamman ravinnepitoisuuden omaavaa konsentraattia. Nestejakeen haihdutusprosessissa lasketaan aluksi pH:ta rikkihapon lisäyksellä, jotta tyyppi pysyy NH<sub>4</sub><sup>+</sup>- muodossa eikä pääse haihtumaan ammoniakkina. Ennen lämmitystä voidaan myös poistaa

hiilidioksidia. (Drosg et al. 2015) Nestejake lämmitetään haihdutuksessa 80–90 asteiseksi, jolloin haihtuva höyry saadaan erotettua ja tiivistettyä kondensaattiksi yhdessä tai useammassa vaiheessa (Drosg et al. 2015; Tampio et al. 2016). Lämpöenergiaa kuulu haihdutuksessa reilusti, noin 300–350 kWh tonnia haihdutettua vettä kohden (Drosg et al. 2015). Haihdutuksen jälkeen kondensaattia voidaan käsitellä kalvoon perustuvalla käänteisosmoosilla ja kierrättää kalvon läpäisemätön retentaatti takaisin vedenerotukseen ja johtaa puhdistunut permeaatti ympäristöön (Marttinen et al. 2013; Tampio et al. 2016). Haihdutuksessa ainoastaan poistetaan vettä, joten lopputuotteen kannalta erona strippaukseen ja kaasun läpäisevän kalvon menetelmään on se, että haihdutuksella tuotetussa konsentraatissa on mukana kaikkia nestejakeen sisältämiä ravinteita, ei pelkästään ammoniumsulfaattia.

Nestejakeesta voidaan saostaa struviittia eli magnesiumammoniumfosfaattia ( $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$ ). Struviittia muodostuu, kun liuoksessa on magnesiumia, typpeä ja fosforia noin suhteessa 1.3:1:0.9 ja pH on sopiva, noin 8,5–9.0. Mädätysjäännöksen nestejakeessa on yleensä ylimääräistä ammoniumtyppeä, joten struviitin muodostumiseen vaaditaan magnesiumin (Mg) ja tarvittaessa fosforihapon ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) lisäystä. (Drosg et al. 2015) Saostuskemikaalit sekoitetaan nesteeseen ja annetaan saostua, ja struviittisakka erotellaan nesteestä suodattamalla. Kolmea tärkeää ravinnetta sisältävä struviitti sopii hidasliukoiseksi fosforilannoitteeksi. Tekniikan haittapuolena on korkeat kustannukset saostuskemikaaleista. (Horn et al. 2020)

Kuivajakeen jatkojalostusmenetelmiä ovat muun muassa kompostointi, terminen kuivaus, biokuivaus, poltto ja pyrolyysi (Lohiniva et al. 2001; Barampouti et al. 2020). Kompostoinnissa mikrobit hajottavat orgaanista ainesta aerobisissa olosuhteissa, ja tuotteena saadaan ravinnepitoista kompostia. Kuivajakeen kompostoinnissa tarvitaan seosaineen (esimerkiksi puuhake) lisäystä, sillä kosteuspitoisuus on suuri ja merkittävä osa orgaanisesta aineksesta on jo hajonnut biokaasuprosessissa (Drosg et al. 2015). Kompostoinnissa kuivajakeen orgaanista ainesta hajoaa, ja yleensä kompostoinnilla ravinteet konsentroituvat hieman pienempään tilavuuteen. Toisaalta osa tyypestä saattaa poistua käsittelyssä. (Latvala 2009; Drosg et al. 2015)

Termisillä menetelmillä, kuten poltolla ja pyrolyysillä, saadaan kuivajakeen tilavuutta pienennettyä merkittävästi, kun orgaaninen aines poistuu kokonaan tai osittain. Termiset menetelmät aiheuttavat yleensä myös typen menettämisen, mutta fosfori jää lopputuotteeneseen. Lietteen poltossa syntyvä tuhka sisältää fosforia heikkoliukoisessa muodossa. (Horn et al. 2020) Pyrolyysissä orgaaninen aines hajoaa termokemiallisesti vähähappisissa tai hapettomissa olosuhteissa korkeassa, esimerkiksi 300–500 °C lämpötilassa. Lopputuotteena saadaan biohiiltä, pyrolyysinestettä ja -kaasua (Hübner & Mumme 2015;

Horn et al. 2020) Fosforipitoista hiilijaetta voidaan hyödyntää peltokäytössä, ja pyrolyysineste ja -kaasu toimivat polttoaineena prosessin energiantuotannossa (Horn et al. 2020). Hübner & Mumme (2015) toteaa pyrolyysinesteen soveltuvan myös palautettavaksi biokaasuprosessin syötteenä.

Kuivajaetta voidaan kuivattaa termisesti lämmön ja ilmavirran avulla. Kuivatettu massa voidaan rakeistaa/pelletöidä, jolloin saadaan helposti käsiteltävä ja varastoitava tuote. (Paavola & Kapuinen 2015) Kuivarae soveltuu peltolevityksessä fosforipitoiseksi maanparannusaineeksi (Marttinen et al. 2013). Kuivausta voidaan tehdä myös hyödyntämällä orgaaniseen hajotustoimintaan perustuvaa lämpötilan nousua. Tätä menetelmää kutsutaan biokuivaukseksi. Biokuivausprosessi muistuttaa paljolti kompostointia, mutta tavoitteena on kosteuden poistaminen niin, että korkea hiilipitoisuus säilyy (Barampouti et al. 2020).

Monissa erilaisia mädätysjäätöksen jalostusketjuja vertailevissa tutkimuksissa keskityttiin nimenomaan nestejakeen käsittelemiseen, ja kuivajae käytettiin peltokäytössä sellaisenaan (Marttinen et al. 2015b; Drosge et al. 2015; Tampio et al. 2016; Horn et al. 2020). Tämä selittynee sillä, että nestejakeeseen päätyy lähes 80 % mädätysjäätöksen massasta (Marttinen et al. 2015b), ja on siten kuljetuskustannusten kannalta huomattavasti merkittävämpi haaste. Kuivajae toimii lannoitteena ja maanparannusaineena sellaisenaan, eikä siten vaadi jatkojalostusta (Tampio et al. 2016). Kuivajakeen jatkojalostus tulee tarpeeseen, jos sitä ei voida sellaisenaan hyödyntää laitoksen lähellä olevilla peltoilla. Nestejakeen jalostusmenetelmän valinnassa tulee ottaa huomioon lähialueiden peltojen ravinnetilanne, jotta tiedetään, onko tarvetta typpilannoitteelle (ammoniumsulfaatti) vai typpi-fosfori-kaliumlannoitteelle (konsentraatti) (Tampio et al. 2016).

#### **4.4 Kierrätyslannoitteiden käyttökelpoisuus kasveille**

Kierrätyslannoitevalmisteita voidaan käyttää viljelyssä kasvien ravinteiden pääasiallisena lähteenä ja tarvittaessa niiden kanssa voidaan käyttää mineraalilannoitteita, toisia kierrätyslannoitevalmisteita tai biologista typensidontaa. (Seppänen et al. 2019) Usein kierrätyslannoitevalmisteet sisältävät useita eri ravinteita ja niiden suhteet poikkeavat kasvien tarpeista. Ravinnetiloihin vaikuttavat prosessointimenetelmät ja raaka-aineet, ja myöskin saman valmisteen erien välillä voi olla eroja ravinteiden pitoisuuksissa ja liukoisuuksissa. Siksi kierrätyslannoitteita käytettäessä lannoituksen suunnittelu voi olla haasteellisempaa kuin mineraalilannoitteita käytettäessä. (Mattila 2019) Lannoituksen tapauskohtainen suunnittelu on tärkeää, jotta lannoituksella vastataan kasvien ravinnetarpeisiin eikä toisaalta aiheuteta ympäristölle ylimääräistä ravinnekuormaa. (Horn et al. 2020)

Mineraalilannoitteissa liukoinen typpi on useimmiten ammoniumnitraattina, mikä mahdollistaa hyvän saatavuuden kasveille kasvukauden alussa, mutta ei ole kuitenkaan liian herkkä huuhtoutumiselle. Sen sijaan kierrätyslannoitevalmisteissa typpi esiintyy monessa eri muodossa, joiden osuudet vaihtelevat riippuen lannoitteiden valmistusmenetelmistä ja raaka-aineista. Kierrätyslannoitteiden tyypin eri muodoista parhaiten kasvien käytettävissä ovat nitraatti- ja ammoniumtyppi, kun taas liukoiset orgaaniset typpiyhdisteet ovat huonommin kasvien saatavilla ja liukenemattomat käytännössä kasveille käytökeltvottomia. (Marttinen et al. 2013) Biokaasuprosessilla on siis positiivinen vaikutus mädätysjäätännöksen tyypin saatavuuteen kasveille.

Erilaisilla viljelykasveilla on erilaiset ravinnetarpeet. Paljon liukoisia ravinteita sisältävät lannoitevalmisteet, kuten mädätysjäätännöksen nestejake, sopivat nopeasti ravinteita tarvitseville kasveille. (Seppänen et al. 2019) Tällaisia ovat esimerkiksi kevätiljat, jotka ottavat runsaasti typpeä kasvukauden alussa (Marttinen et al. 2013). Lannoitevalmisteet, joissa ravinteet ovat sitoutuneet orgaaniseen ainekseen (esim. komposti), vapauttavat ravinteita pitkin kasvukautta. Siksi ne sopivat hyvin kasveille, joiden ravinteiden tarve painottuu kasvukauden loppuun, esimerkiksi juureksille. (Seppänen et al. 2019) Myös esimerkiksi struviitissa ravinteet ovat heikkoliukoisessa muodossa, jolloin ne vapautuvat maaperään hitaasti (Horn et al. 2020). Joitakin lannoitteista, esimerkiksi ammoniumsulfaattia, voidaan käyttää täydennyslannoitukseen myös kesken kasvukauden (Seppänen et al. 2019).

Marttinen et al. (2013) tutkimuksen mukaan rejektiveden sisältämä liukoinen typpi vastaa lannoitusarvoltaan mineraalilannoitteen typpeä. Nestejakeen typpi on lähes kokonaan liukoista, ja suurin osa tyypestä on ammoniumtyypeä. Kiinteiden kierrätyslannoitevalmisteiden liukoinen typpi sen sijaan on hitaammin käytettävissä kuin lietelannan, nestemäisen kierrätyslannoitevalmisteen tai mineraalilannoitteen sisältämä typpi. Tämä ero selittyy osittain kuitenkin levitysmenetelmällä, sillä kylvön yhteydessä tai kasvustoon sijoitetun nestemäisen lannoitteen typpi on ravinteiden oton kannalta edullisemmassa asemassa verrattuna pintalevitysmenetelmällä levitettyihin kiinteisiin lannoitevalmisteisiin. Levitysmenetelmällä on merkitystä, sillä esimerkiksi pintalevitys voi aiheuttaa suuriakin ammoniakkitappioita, kun sitä pääsee haihtumaan ilmaan levityksen yhteydessä. Biokaasuprosessi ja mekaaninen vedenerotus ei muuttanut lantaperäisen fosforin liukoisuutta. Kuivajakeen rakeistaminen kuitenkin heikensi fosforin vesiliukoisuutta. Nestejakeessa fosfori esiintyi pääosin vesiliukoisena, kun taas kuivajakeessa liukoisen fosforin osuus on pienempi. (Marttinen et al. 2013)

Nestemäisissä kierrätyslannoitteissa on otettava huomioon liuksen ravinnepitoisuus logistiikan sekä lannoitteen levityksen kannalta. Joissakin tuotteissa, kuten strippausjännöksessä, ravinnepitoisuudet ovat niin pieniä, että levitysmäärien pitäisi olla hyvin suuria, jopa yli 100 t/ha (Tampio et al. 2016). Liian korkeat levitysmäärät voivat aiheuttaa maan vettymistä, (Rigby & Smith 2011, Tampio et al. 2016 mukaan) ja suurien määrien levittäminen on myös epäkäytännöllistä ja kallista.

Eryteisesti mädätysjännöksen kuivajae sisältää runsaasti orgaanista ainetta, ja siksi se soveltuu hyvin maanparannusaineeksi. Orgaanisen aineksen lisäys parantaa monia maaperän ominaisuuksia: multavuutta, huokoisuutta, vedenläpäisykykyä, biologista aktiivisuutta sekä veden- ja ravinteiden pidätyskykyä (Seppänen et al. 2019). Kuivajae sisältää myös paljon fosforia, mutta suurin osa siitä on heikkoliukoisessa muodossa (Marttinen et al. 2013). Fosforin ja muiden ravinteiden heikkoliukoisuuden takia kiinteät maanparannusaineet soveltuvat yleensä parhaiten syyslevitykseen, ja niillä voidaan kasvattaa maaperän ravinnevarastoa ja mahdollistaa monivuotista lannoitusvaikutusta (Seppänen et al. 2019). Mädätysjännöksen kuivajae ja kuivajakeesta valmistettu komposti voidaan luokitella fosforipitoiseksi maanparannusaineeksi/lannoitteeksi (Marttinen et al. 2013; Drosge et al. 2015).

Möller & Müller (2012) selvittivät anaerobisen mädätyksen vaikutusta mädätysjännöksen ravinteiden käyttökelpoisuuteen kasveille ja sadon tuottoon. Mädätyksen vaikutusta ravinteiden saatavuuteen on tutkittu kokoamalla mädätysjännöksen ominaisuuksia useista tutkimuksista, ja vertaamalla näitä arvoja käsittelemättömän syötteen arvoihin. Taulukossa 3 on koottuna mädätysprosessin vaikutuksia tämän työn kannalta olennaisiin suureisiin.

Taulukko 3. *Mädätysprosessin vaikutukset mädätysjännöksen lannoitekäytön kannalta olennaisiin ominaisuuksiin (mukaillen lähteestä Möller & Müller 2012)*

	Mädätysjännös syötteestä		
	Nestemäiset eläinten lannat	Kasvitähteet ja viherlannoitteet	Energiasadot
Käsittely ja jakelu	0	0	+++
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> /TN suhde	+	+++	+++
Lietteen pH	++	++	++
Typen saatavuus	0	++	++
Fosforin saatavuus	0	0	0
Sadon kasvu	0	++	+++

0 = ei vaikutusta; + pieni hyöty; ++ suuri hyöty; +++ erittäin suuri hyöty



Selkeä positiivinen vaikutus nähdään ammoniumtypen osuuden kasvussa, mikä samalla parantaa typen saatavuutta. Vaikutus on suuri erityisesti sellaisilla syötteillä, joiden ammoniumtypen osuus ennen mädätystä on pieni. Fosforin saatavuus kasveille sen sijaan ei muuttunut biokaasuprosessissa. Nestemäisissä eläinten lannoissa vaikutus on pienempi, sillä suuri osa niiden sisältämästä tystä on valmiiksi ammoniumtyyppiä (Hamelin et al. 2013). Sadon kasvun kannalta nestemäiset eläinten lannat toimivat lannoitteena yhtä hyvin ilman biokaasuprosessia, mutta muilla syötteillä havaittiin selkeää kehitystä soveltuvuudessa lannoitekäyttöön.

#### **4.5 Ravinnekierrätyksen taloudellisia näkökulmia**

Mädätysjäätännöksen hyödyntämisen taloudellisessa tarkastelussa mietitään erityisesti kahta tekijää: logistiikkakustannukset ja prosessointikustannukset (Drosg et al. 2015). Logistiikkakustannuksiin luetaan useissa laskelmissa kuljetus ja levitys, mutta toisaalta myös ravinnetuotteiden varastointi on usein biokaasulaitoksen vastuulla. Biokaasulaitoksen kierrätyslannoitteiden kuljetusten kannattavuutta (rahan tai energiankulutuksen näkökulmasta) on tutkittu useissa tutkimuksissa, ja yhteinen linja tuloksissa näyttää olevan, että lähelle kuljetettuna prosessoimaton tai kuiva- ja nestejakeeksi eroteltu mädätysjäätännös on edullisin vaihtoehto, ja pidemmälle prosessoitu kierrätyslannoite tulee edullisemmaksi vaihtoehdoksi kuljetusmatkan pidentyessä. (Marttinen et al. 2015b; Drosg et al. 2015; Tampio et al. 2016; Horn et al. 2020) Joissain tapauksissa prosessoitu kierrätyslannoite tulee prosessoimatonta kannattavammaksi jo noin 30 km kuljetusmatkalla, joskus vasta noin 80 km kuljetusmatkalla (Drosg et al. 2015).

Jalostus aiheuttaa biokaasulaitokselle lisäkustannuksia sähkön- ja lämmönkulutuksesta, kemikaaleista, työstä ja laitteiston kunnossapidosta sekä investoinneista. Tekniikasta riippuen investoinnit jatkojalostuslaitteistoon voivat olla mittavia, ja siksi niitä esiintyykin lähinnä suurilla laitoksilla, jossa massavirrat ovat merkittäviä. Esimerkiksi kalvosuodatuslaitteiston hinta voi olla 600 000 €, ja lisäksi tarvitaan sekoittimia, varastointialtaita ja muita rakenteita. (Horn et al. 2020) Laitteistojen kunnossapidosta aiheutuu myös kustannuksia, ja usein nestejakeen käsittelyssä esimerkiksi kalvomenetelmillä haasteena on kuiva-ainepitoisuuksista johtuvat tukkeutumistilanteet (Kaljunen 2018). Kokonaisuudessaan mädätysjäätännöksen jatkojalostusmenetelmien tulisi olla sellaisia, että pitkällä aikavälillä jalostettujen kierrätyslannoitetuotteiden kokonaiskustannukset ovat pienemmät kuin kustannukset ilman jalostusta, ja että investointien takaisinmaksuaika on kohtalainen.

Energiankulutus on merkittävä tekijä mädätysjäätännöksen prosessoinnin kannattavuuden arvioinnissa, sillä esimerkiksi Marttinen et al. (2015b) mukaan nestejakeen jatkokäsittelymenetelmät (strippaus, haihdutus ja niiden yhdistelmä) kuluttivat 10–14 % biokaasulaitoksen syötteiden energiasisällöstä. Mädätysjäätännöksen jatkojalostus vähentää siten myytävän energian määrää. Jatkojalostuksen kannattavuus nousee, mikäli laitoksen tuottamaa energiaa ei saada myytyä muualle hyvään hintaan. Jalostusprosessien käyttökustannuksiin sisältyy tekniikasta riippuen kustannuksia myös kemikaalien kulu- tuksesta. Huomionarvoista on se, että kemikaalien käyttömäärät ovat suuria, esimerkiksi ammoniumsulfaatin (40 kg/t) valmistuksessa strippauksella rikkihappoa kului 80 l (93 %) käsiteltyä nestejakeetonna kohden (Tampio et al. 2016).

Lannoitetuotteiden hinta määräytyy teoriassa sen sisältämien ravinteiden (N, P, K) mas- san mukaan (Drosg et al. 2015). Suomessa erään käytännön mukaan nestejakeesta tu- loja saadaan peltoon levitettynä 1 €/kg liukoista typpeä, fosforia ja kaliumia, mikä on samaa luokkaa vastaavien mineraalilannoitteiden kanssa (Horn et al. 2020). Viljelijän näkökulmasta hinnan voidaan ajatella määräytyvän sen mukaan, minkä arvoisen mää- rän mineraalilannoitetta kierrätyslannoitteella voidaan korvata.

Jatkojalostusmenetelmiä voidaan myös yhdistellä, ja suuren mittakaavan laitoksella vii- sas ratkaisu ravinteiden kierrätykseen voikin löytyä usean jatkojalostusteknologian hyö- dyntämisestä. Yksi vaihtoehto on yhdistää strippaus, haihdutus ja käänteisosmoosi niin, että tuotetaan strippaamalla ammoniumsulfaattia ja jäljelle jäänyt laimeasti ravinnepitoi- nen strippausjäätännös haihdutetaan. Haihdutuksen konsentraatti hyödynnetään lannoit- teena ja kondensaatti käsitellään käänteisosmoosilla niin, että kalvon läpäisemätön re- tentaatti palautetaan mekaaniseen vedenerotukseen ja puhdistettu vesi johdetaan ympäristöön. Verrattuna pelkkään strippaukseen energiankulutus on tässä suurempi, mutta tässä myös strippausjäätännöksen ravinteet saadaan talteen haihdutuksen avulla. (Tampio et al. 2016) Jalostusmenetelmiä yhdistelemällä saadaan massavirrat paremmin hyödynnettyä, mutta investointi- ja käyttökustannukset luonnollisesti kasvavat.

Nestejakeen jalostustekniikoiden kannattavuuden vertaileminen keskenään on haasta- vaa, sillä vertailukelpoista tietoa eri tekniikoista on heikosti saatavilla. Tampion et al. (2016) mukaan neljän erilaisen jalostusketjun tehokkaimmaksi vaihtoehdoksi näyttäytyi haihdutus yhdistettynä käänteisosmoosin kanssa tuotteen korkean ravinnepitoisuuden ja pienen massan sekä käsittelyn alhaisen energiankulutuksen takia. Toisaalta kuitenkin strippauksen energiankulutus on toisissa arvioissa ollut haihdutusta pienempi (Drosg et al. 2015; Marttinen et al. 2015b). Energiankulutus ei kuitenkaan anna kokonaiskuvaa vertailuun, sillä laitoksen oman energian hinta riippuu sen muista hyödyntämismahdolti- suuksista. Useat ravinteiden talteenotto- ja jalostustekniikat ovat kehityksessään vielä

laboratorio- tai pilottivaiheessa, ja niistä on saatavilla kannattavuuslaskelmia vasta pienen mittakaavan kokeista (Beckinghausen et al. 2020). Ravinteiden talteenotto- ja jalostustekniikoiden yleistymiseksi tarvittaisiinkin lisää tutkimusta teknologioiden kannattavuudesta sekä suuremman mittakaavan kokeiluja uusista menetelmistä.

Loppujen lopuksi mädätysjäätännöksen prosessoinnin taloudellinen kannattavuus on tapauskohtaista ja riippuu myös prosessoinnilla saavutettavista lisähyödyistä (prosessiveden kierrätys, ylijäämälämmön hyödyntäminen) (Drosg et al. 2015) ja lähialueiden peltojen ravinnetarpeesta. Mikäli lähialueiden pelloilla on fosforiylijäämää, tulee typpilannoitteen (ammoniumsulfaatti) tuottaminen kannattavammaksi. (Horn et al. 2020) Mädätysjäätännöksen prosessoinnin kannattavuutta tulee tarkastella laajasti ottaen huomioon edellä mainitut näkökulmat sekä lisäksi vallitseva lainsäädäntö ja kierrätyslannoitetuotteiden markkinatilanne, joita ei tässä työssä käsitellä enempää.

## 5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Biokaasulaitoksilla on tärkeä rooli orgaanisten jätteiden ja sivuvirtojen käsittelijänä, uusiutuvan energian tuottajana, ravinteiden kierrättäjänä sekä paikallisen kiertotalouden edistäjänä. Suomessa biokaasun tuotantoa voitaisiin kasvattaa moninkertaiseksi, sillä hyödyntämättömiä syötteenä sopivia biomassoja syntyy paljon.

Keskitettyllä biokaasulaitoksella käsitellään useita erilaisia syötteenä maataloudesta, yhteiskunnista ja teollisuudesta, joten laitokselle eduksi on hyvä sijainti syötteen tuottajien ja tuotteiden (biometaani, sähkö, lämpö ja kierrätyslannoitteet) käyttäjien läheisyydessä. Erilaisten syötteenä yhteismädätyksessä on useita etuja. Sekoittamalla kuivempia ja kosteampia syötteenä keskenään voidaan säätää syöteseoksen kuiva-ainepitoisuutta prosessiin sopivaksi laimennusvettä säästämällä. Orgaanisen aineksen pitoisuudeltaan (VS) erilaisia syötteenä sekoittamalla saadaan optimoitua biokaasun tuotto kuormittamatta reaktorin liialla orgaanisen aineen kuormituksella. Ravinnepitoisuudeltaan erilaisten syötteenä sekoituksella voidaan vaikuttaa reaktorin ravinnetasapainoon sekä mädätysjäätöksen ravinnesisältöön.

Biokaasuprosessissa syötteenä sisältämät ravinteet siirtyvät mädätysjäätöksen pääosin muuttumattomana. Syötteenä orgaaniseen ainekseen sitoutunutta typpeä kuitenkin liukoistuu prosessissa ammoniumtypeksi, jonka pitoisuus nousee biokaasuprosessin aikana 30–50 % raaka-aineesta riippuen. Tämä parantaa typen saatavuutta kasveille, ja mahdollistaa ravinteiden hyödyntämisen myös sellaisista biomassoista, missä ravinteet eivät ilman käsittelyä ole kasveille käyttökelpoisia. Suuria ravinnepitoisuuksia havaitaan muun muassa lannoissa ja muissa eläinperäisissä syötteenä, kun taas hiilihydraattipitoisissa syötteenä ravinnepitoisuudet ovat pienempiä.

Mädätysjäätöstä voidaan käyttää kierrätyslannoitteena sellaisenaan, mutta tyypillisesti suuren mittakaavan laitoksella sitä käsitellään vähintään mekaanisessa vedenerotuksessa, jonka tuotteina saadaan typpipitoinen nestejäte ja fosforipitoinen kuivajäte. Nestejätettä voidaan käyttää kierrätyslannoitteena sellaisenaan tai jatkojalostaa väkevämmiksi kierrätyslannoitevalmisteiksi useiden eri tekniikoiden avulla. Nestejätettä voidaan haihduttaa konsentraatiksi tai siitä voidaan strippauksen tai kalvotekniikoiden avulla tuottaa ammoniumsulfaattia. Kuivajäte voidaan käsitellä kompostoimalla, eri kuivaustekniikoilla tai termisillä menetelmillä. Nestejätteenä päätyy noin 80 % mädätysjäätöksen massasta, joten sen jatkojalostus on usein tärkeämpää kuin kuivajätteen.

Ravinnekierrätyksen kannattavuuteen biokaasulaitoksella vaikuttaa erityisesti kierrätyslannoitteiden kuljetuskustannukset ja prosessointikustannukset. Mädätysjäännöksen jatkojalostukseen liittyy merkittäviä investointi- ja käyttökustannuksia, mutta prosessoinnilla saadaan vähennettyä lannoitteen kuljetus- ja varastointikustannuksia huomattavasti. Mikäli lannoitteet saadaan hyödynnettyä lähialueella sellaisenaan, jatkojalostus ei todennäköisesti ole kannattavaa. Pidemmällä keskimääräisillä kuljetusmatkoilla (tapauksesta riippuen 30–80 km) lannoitteen kuljetusten säästö ylittää prosessointikustannukset ja silloin jalostukseen kannattaa investoida. Kierrätyslannoitteiden jatkojalostuksen kannattavuuden arviointia ja jalostusmenetelmän valintaa tulee lähestyä tapauskohtaisesti, sillä jalostuksen kannattavuus ja sopiva jalostusmenetelmä riippuu muun muassa lähialueiden viljelysmaiden ravinnetilanteesta ja prosessoinnilla saavutettavista lisähyödyistä kuten prosessiveden kierrätyksestä ja ylijäämäenergian hyödyntämisestä.

Ravinteiden kierrätykseen tulee panostaa tulevaisuudessa yhä enemmän, jotta biomassojen ravinteet saadaan hyödynnettyä tehokkaammin maataloudessa. Biokaasulaitokset ovat tässä avainasemassa, ja tässä vaiheessa olisikin tärkeää saada biokaasulaitosten tuottamat kierrätyslannoitteet kilpailemaan mineraalilannoitteiden kanssa. Ravinteiden talteenotto- ja jalostustekniikoista tarvittaisiin lisää tutkimusta ja pilottikokeiluja, jotka auttaisivat kehittämään ravinteiden kierrätyksestä biokaasulaitoksille kannattavaa liiketoimintaa.

## LÄHTEET

- Al Seadi, T., Rutz, D., Janssen, R., & Drosch, B. (2013). Biomass resources for biogas production. In Wellinger, A., Murphy J. D., Baxter, D. & Braun, R. (Eds.), *The biogas handbook: Science, production and applications*. Elsevier Science & Technology. pp. 19-51.
- Angelidaki, I., & Ellegaard, L. (2003). Codigestion of manure and organic wastes in centralized biogas plants: Status and Future Trends. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 109. pp. 95–105.
- Bachmann, N. (2013). Design and engineering of biogas plants. In Wellinger, A., Murphy J. D., Baxter, D. & Braun, R. (Eds.), *The biogas handbook: Science, production and applications*. Elsevier Science & Technology. pp. 191-211.
- Barampouti, E. M., Mai, S., Malamis, D., Moustakas, K., & Loizidou, M. (2020). Exploring technological alternatives of nutrient recovery from digestate as a secondary resource. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134. p. 110379
- Beckinghausen, A., Odlare, M., Thorin, E., & Schwede, S. (2020). From removal to recovery: An evaluation of nitrogen recovery techniques from wastewater. *Applied Energy*, 263. p. 114616.
- Biokaasuohjelmaa valmisteleavan työryhmän loppuraportti. (2020). Työ- ja elinkeinoministeriö. s. 70. Saatavissa: <http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/162032>
- Chen, Q., & Liu, T. (2017). Biogas system in rural china: Upgrading from decentralized to centralized? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78. pp. 933-944.
- Drosch, B., Fuchs, W., Al Seadi, T., Madsen, M., & Linke, B. (2015). Nutrient recovery by biogas digestate processing. *IEA Bioenergy*. p. 40.
- Hamelin, L., Baky, A., Cano-Bernal, Grönroos, J., Kuligowski, K., Pehme, S., Rankinen, K., Skura, D., Wenzel, H., Wesnæs, M., & Ziolkowsky, M. (2013). Reference life cycle assessment scenarios for manure management in the Balti Sea regions. *Baltic Manure WP5 Assessing Sustainability of Manure Technology Chains*. p. 79. Saatavissa: <https://core.ac.uk/download/pdf/50695113.pdf>
- Horn, S., Seppänen, A., Winqvist, E., Lehtoranta, S., & Luostarinen, S. (2020). Biokaasulaitoksen mädätysjäännöksen hyödyntämisvaihtoehdot – vaihtoehtojen ilmastovaikutukset ja taloudellisuus. *Suomen ympäristökeskus*. s. 50. Saatavissa: <http://hdl.handle.net/10138/321266>

Hübner, T., & Mumme, J. (2015). Integration of pyrolysis and anaerobic digestion – use of aqueous liquor from digestate pyrolysis for biogas production. *Bioresource Technology*, 183. pp. 86-92.

Huttunen, M. J., Kuittinen, V., & Lampinen, A. (2018). SUOMEN BIOKAASULAITOSREKISTERI N:O 21: tiedot vuodelta 2017. University of Eastern Finland. Reports and Studies in Forestry and Natural Sciences, 33. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-61-2856-6>

Innovative waste & biogas solutions. (2019). Ministry of foreign affairs of Denmark, The Trade Council. Saatavissa (viitattu 31.3.2021): [https://www.biogasglobal.com/Admin/Public/Download.aspx?file=Files%2fFiles%2fBiogas-Go-Global%2fResults%2f2019-01-30-WBA-Partner-Catalog\\_vf.pdf](https://www.biogasglobal.com/Admin/Public/Download.aspx?file=Files%2fFiles%2fBiogas-Go-Global%2fResults%2f2019-01-30-WBA-Partner-Catalog_vf.pdf)

Jiang, X., Sommer, S. G., & Christensen, K. V. (2011). A review of the biogas industry in China. *Energy Policy*, 39. pp. 6073-6081.

Kaljunen, J. (2018). Nitrogen harvesting from liquid waste streams using hydrophobic gas permeable membranes. Master's thesis. p. 50

Karki, R., Chuenchart, W., Surendra, K. C., Shrestha, S., Raskin, L., Sung, S., et al. (2021). Anaerobic co-digestion: Current status and perspectives. *Bioresource Technology*, 330. p.125001

Komission tiedonanto euroopan parlamentille, eurooppaneuvostolle, neuvostoille, euroopan talous- ja sosiaalikomitealle ja alueiden komitealle: Euroopan vihreän kehityksen ohjelma. (2019). Euroopan Komissio. s. 26. Saatavissa (viitattu 3.2.2021): [https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0003.02/DOC\\_1&format=PDF](https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0003.02/DOC_1&format=PDF)

Kymäläinen, M. (2015). Anaerobinen hajoaminen ja sen hallinta biokaasureaktorissa. Julkaisussa Kymäläinen, M. & Pakarinen, O. (toim.) Biokaasuteknologia: Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen. Hämeen ammattikorkeakoulu. s. 59-81.

Latvala, M. (2009). Paras käytettävissä oleva tekniikka (BAT): Biokaasun tuotanto suomalaisessa toimintaympäristössä. Suomen ympäristökeskus. s. 117 Saatavissa: <http://hdl.handle.net/10138/37998>

Lohiniva, E., Mäkinen, T., & Sipilä, K. (2001). Lietteiden käsittely: Uudet ja käytössä olevat tekniikat. VTT Technical Research Centre of Finland. s. 160. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2001/T2081.pdf>

- Marttinen, S., Luostarinen, S., Winqvist, E., & Timonen, K. (2015a). Rural biogas: Feasibility and role in Finnish energy system, BEST suitable bioenergy solutions for tomorrow. Cleen Oy. p. 31. Saatavissa: <http://jukuri.luke.fi/handle/10024/543444>
- Marttinen, S., Paavola, T., Ervasti, S., Salo, T., Kapuinen, P., Rintala, J., et al. (2013). Biokaasulaitosten lopputuotteet lannoitevalmisteina. MTT. 70 s. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-487-432-8>
- Marttinen, S., Tampio, E., Sinkko, T., Timonen, K., Luostarinen, S., Grönroos, J., Manninen, K. (2015b) Biokaasulaitokset – syötteistä lopputuotteisiin: Energia, ravinteet ja ympäristövaikutukset. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 14/2015. Luonnonvarakeskus, Helsinki. 69 s. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-013-9>
- Marttinen, S., Venelampi, O., Iho, A., Koikkalainen, K., Lehtonen, E., Luostarinen, S., Rasa, K., Sarvi, M., Tampio, E., Turtola, E., Ylivainio, K., Grönroos, J., Kauppila, J., Koskiahho, J., Valve, H., Laine-Ylijoki, J., Lantto, R., Oasmaa, A., zu Castell-Rüdenhausen, M. (2017). Kohti ravinteiden kierrätyksen läpimurtoa. Nykytila ja suositukset ohjaukskeinojen kehittämiseksi. Luonnonvarakeskus. 46 s. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-437-3>
- Mattila, T. (2019). Lähestymistapoja lannoitus suunnitteluun – Kierrätysravinteiden haasteita. Suomen ympäristökeskus. s. 40. Saatavilla: <http://hdl.handle.net/10138/302787>
- Möller, K., & Müller, T. (2012). Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: A review. *Engineering in Life Sciences*, 12. pp. 242-257.
- Murphy, J. D., & Thamsiroj, T. (2013). Fundamental science and engineering of the anaerobic digestion process for biogas production. In Wellinger, A., Murphy J. D., Baxter, D. & Braun, R. (Eds.), *The biogas handbook: Science, production and applications*. Elsevier Science & Technology. pp. 104-130
- Pääministeri Sanna Marinin hallituksen ohjelma 10.12.2019: Osallistava ja osaava Suomi – sosiaalisesti, taloudellisesti ja ekologisesti kestävä yhteiskunta (2019). Valtio-neuvosto. s. 216. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-287-808-3>
- Paavola, T. & Kapuinen, P. (2015) Mädätysjäännöksen käsittely ja hyödyntäminen. Julkaisussa Kymäläinen, M. & Pakarinen, O. (toim.) *Biokaasuteknologia: Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen*. Hämeen ammattikorkeakoulu. s. 94-123.
- Ravinteiden kierrätyksen toimenpideohjelma 2019-2030: "Kokeiluista tuloksiin - ravinteiden kierrätyksestä arkea" (2019). Ympäristöministeriö, Työ- ja elinkeinoministeriö, Maa- ja metsätalousministeriö, Valtiovarainministeriö. p. 8. Saatavissa: <https://ym.fi/ravinteidenkierratys>



- Razon, L. (2018). Reactive nitrogen: A perspective on its global impact and prospects for its sustainable production. *Sustainable Production and Consumption*, 15. pp. 35–48.
- Rigby, H. & Smith, S. (2011) New markets for digestate from anaerobic digestion. Desktop study on new markets. *Wrap*. p. 50
- Roinila, J. (2021). Kaasuautojen markkinat Suomessa ja Euroopassa. Saatavissa (viitattu 23.1.2021): <https://kaasuautoilijat.fi/2019/07/24/kaasuautomarkkinoiden-kehitys/>
- Schnürer, A., & Jarvis, Å. (2009). Microbiological handbook for biogas plants. Swedish Waste Management, Swedish Gas Centre. p. 138.
- Seppänen, A., Luostarinen, S., & Pesonen, L. (2019). Kierrätyslannoitus: Suunnittelu, käytännöt ja mahdollisuudet tulevaisuudessa. Luonnonvarakeskus. s. 16. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-759-6>
- Sitra (2007) Lietteenkäsittelyn nykytila Suomessa ja käsittelymenetelmien kilpailukyky -selvitys. Pyöry Environment Oy. s. 52. Saatavissa: <https://media.sitra.fi/2017/02/27172733/LietteenkC3A4sittely-2.pdf>
- Stamatelatos, K., Antonopoulou, G., & Lyberatos, G. (2016). Production of biogas via anaerobic digestion. In Luque, R., Campelo, J., & Clark, J. (Ed.), *Handbook of biofuels production: Processes and technologies*. Elsevier Science & Technology. pp. 266-304
- Tähti, H., & Rintala, J. (2010). Biometaanin ja -vedyn tuotantopotentiaali suomessa. Jyväskylän yliopisto. 45 s. Saatavissa: <https://jyx.jyu.fi/handle/123456789/37062>
- Tambone, F., Orzi, V., D'Imporzano, G., & Adani, F. (2017). Solid and liquid fractionation of digestate: Mass balance, chemical characterization, and agronomic and environmental value. *Bioresource Technology*, 243. pp. 1251-1256.
- Tampio, E., Marttinen, S., & Rintala, J. (2016). Liquid fertilizer products from anaerobic digestion of food waste: Mass, nutrient and energy balance of four digestate liquid treatment systems. *Journal of Cleaner Production*, 125. pp. 22-32.
- Tao, W., & Ukwuani, A. T. (2015). Coupling thermal stripping and acid absorption for ammonia recovery from dairy manure: Ammonia volatilization kinetics and effects of temperature, pH and dissolved solids content. *Chemical Engineering Journal*, 280. pp. 188-196.
- Virolainen-Hynnä, A. (2020). Biokaasun tuotanto ja käyttö suomessa 2030. Suomen Biokierto & Biokaasu ry. s. 21. Saatavissa: [https://biokierto.fi/wp-content/uploads/2020/06/Biokaasu2030\\_raportti\\_17062020.pdf](https://biokierto.fi/wp-content/uploads/2020/06/Biokaasu2030_raportti_17062020.pdf)

Winqvist, E., Rikkonen, P., & Varho, V. (2018). Suomen biokaasualan haasteet ja mahdollisuudet. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 47/2018. Luonnonvarakeskus. s. 21. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-630-8>