

## BIOKAASUTEKNOLOGIA

### Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen



**Maritta Kymäläinen ja Outi Pakarinen (toim.)**  
**Suomen Biokaasuyhdistys ry**

BIOKAASUTEKNOLOGIA Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen

Maritta Kymäläinen ja Outi Pakarinen (toim.)  
Suomen Biokaasuyhdistys ry

painettu

ISBN 978-951-784-770-4

ISSN 1795-4231

HAMKin julkaisuja 17/2015

e-julkaisu

ISBN 978-951-784-771-1 (PDF)

ISSN 1795-424X

HAMKin e-julkaisuja 36/2015

© Hämeen ammattikorkeakoulu ja kirjoittajat

**JULKAISIJA – PUBLISHER**

Hämeen ammattikorkeakoulu

PL 230

13101 HÄMEENLINNA

puh. (03) 6461

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

[www.hamk.fi/julkaisut](http://www.hamk.fi/julkaisut)

Ulkoasu ja taitto: HAMK Julkaisut / Paula Numminen

Kannen kuvat: Outi Pakarinen (taustakuva), Envor Biotech Oy (biokaasulaitos)

Gasum Oy (tankkausasema) ja Biovakka Suomi Oy (mädätysjäätännöksen levitystä)

Painopaikka: Forssa Print Oy, Forssa

Hämeenlinna, joulukuu 2015

## ESIPUHE

Suomen Biokaasuyhdistys ry pyrkii toiminnallaan tuomaan esiin biokaasuteknologian monipuolisia mahdollisuuksia, välittämään alan erikoisosaamista ja edistämään teknologian kehittymistä ja käyttöönottoa. Tämä oppikirja on yksi osoitus yhdistyksen toiminnasta näiden tavoitteiden saavuttamiseksi.

Biokaasualan oppikirjan tarve on tiedostettu biokaasutuotantoon kohdistuvan nopeasti lisääntyneen kiinnostuksen myötä. Kentällä on kaivattu nimenomaan suomenkielistä, perusteista lähtevää ja soveltavaa tietoutta aiheesta.

Biokaasuteknologia, monialaisena toimintana, kytkeytyy hyvinkin eri alojen ja eri asteisten oppilaitosten, korkeakoulujen ja yliopistojen opetukseen. Tämän oppikirjan toivotaankin palvelevan laajasti eri tarkoituksissa ja useita käyttäjäryhmiä, ammattilaisista alan opiskelijoihin.

Biokaasuteknologiaan liittyvän kasvavan osaamisen myötä lisätään teknologian käyttöönottoa, jo käytössä olevien prosessien parempaa hallintaa ja alan kehittymistä osaavien tekijöiden toimesta. Samalla välitetään tietoutta biokaasuteknologian monista mahdollisuuksista uusiutuvan energiatuotannon, kestävien ympäristötoimien ja kiertotalouden edistämiseksi.

Kiitos Tekniikan Edistämissäätiön erikoisrahastolle, Gasum Kaasurahastolle, stipendistä, joka mahdollisti tämän kirjan tuottamisen. Kiitos kaikille kommentoijille, kuvien lahjoittajille ja taitosta vastanneille. Erityiskiitos kaikille kirjoittajille hyvästä yhteistyöstä ja asiantuntevista teksteistänne.

Hämeenlinnassa, joulukuussa 2015

Maritta Kymäläinen ja Outi Pakarinen

# Sisällys

Johdanto.....	7
<b>1. Biokaasualan monet mahdollisuudet.....</b>	<b>9</b>
1.1 Biokaasuteknologia jätteiden ja sivutuotteiden käsittelyssä .....	11
1.2 Biokaasuteknologia jätevesien käsittelyssä .....	13
1.3 Biokaasua peltobiomassoista .....	16
1.4 Biokaasun hyödyntäminen .....	17
1.5 Mädätysjäännöksen hyödyntäminen .....	18
1.6 Biokaasutuotannon tukeminen Suomessa.....	19
<b>2. Biokaasutuotannon raaka-aineet.....</b>	<b>21</b>
2.1 Raaka-aineiden valinta ja hallinta.....	22
2.1.1 Kuiva-aine (TS) ja orgaaninen aines (VS).....	23
2.1.2 Ravinteet.....	26
2.1.3 Metaanituoton määrittäminen .....	27
2.2 Yleistä biokaasutuotoista .....	31
2.3 Maatalouden raaka-ainelähteet .....	32
2.3.1 Lanta.....	33
2.3.2 Kasvibiomassat.....	37
2.4 Yhdyskuntabiojäte .....	39
2.5 Puhdistamolietteet.....	41
2.6 Teollisuuden sivutuotteet ja jätteet .....	43
<b>3. Biokaasutuotannon raaka-aineiden esikäsittely .....</b>	<b>48</b>
3.1 Maatalouden lantojen ja kasvibiomassojen käsittely.....	48
3.2 Biojätteen esikäsittely .....	51
3.3 Lietteiden esikäsittely .....	53
3.3.1 Puhdistamolietteet .....	53
3.3.2 Rasva- ja teollisuuslietteet.....	55
3.4 Esikäsittelyjä kaasutuoton tehostamiseksi .....	56
3.4.1 Fysikaaliset menetelmät.....	56
3.4.2 Kemialliset menetelmät .....	57
3.4.3 Biologiset menetelmät.....	57
<b>4. Anaerobin hajoaminen ja sen hallinta biokaasureaktorissa .....</b>	<b>59</b>
4.1 Anaerobisen hajoamisprosessin päävaiheet .....	60
4.1.1 Hydrolyysi .....	61
4.1.2 Fermentaatio, asidogeneesi.....	62
4.1.3 Anaerobin hapettuminen, asetogeneesi .....	62
4.1.4 Metaanin muodostuminen, metanogeneesi .....	62
4.2 Prosessin toimintaedellytykset .....	63
4.2.1 Lämpötila.....	63
4.2.2 pH ja alkaliniteetti.....	65

4.2.3	Ravinteet ja hivenaineet.....	66
4.2.4	Inhivoivat ja toksiset aineet .....	67
4.3	Prosessihallinta .....	71
4.3.1	Orgaaninen kuormitus, OLR .....	72
4.3.2	Viipymäaika, HRT .....	74
4.3.3	HRT vs. OLR.....	75
4.3.4	Prosessimittaukset ja analyysit.....	75
4.3.5	Reaktorin käynnistys ja häiriötilanteiden hallinta.....	77
<b>5.</b>	<b>Biokaasuprosessit ja laitosaset</b> .....	<b>82</b>
5.1	Märkä- ja kuivaprosessi.....	82
5.2	Jatkuva- ja panostoinen prosessi .....	83
5.3	Yksi- ja kaksivaiheinen prosessi .....	88
5.4	Biokaasulaitoksen tasetarkastelua.....	89
5.4.1	Esimerkki maatilatason biokaasulaitoksen energiataseesta .....	90
5.4.2	Esimerkki biokaasulaitoksen massa- ja ravinnetaseesta ...	91
<b>6.</b>	<b>Mädätysjäätännöksen käsittely ja hyödyntäminen</b> .....	<b>94</b>
6.1	Mädätysjäätännöksen yleiset ominaisuudet .....	94
6.2	Riskit, hygienia ja haitta-aineet .....	95
6.3	Mädätysjäätännöksen käsittely- eli prosessointivaihtoehtoja .....	99
6.3.1	Erotusprosessit.....	99
6.3.2	Nestejakeen jatkokäsittely .....	102
6.3.3	Kuivajakeen jatkokäsittely.....	110
6.4	Erilaisia lopputuotteita – yleisesittely vaihtoehdoista ja käyttökohteista.....	112
6.5	Lannoitekäyttö .....	114
6.5.1	Orgaaninen lannoite, maanparannusaine .....	114
6.5.2	Levitystekniikat.....	115
6.5.3	Orgaaniset lannoitevalmisteet kasvinravitsemuksessa ....	119
6.6	Logistiikka ja varastointi.....	120
<b>7.</b>	<b>Biokaasun käsittely ja hyödyntäminen</b> .....	<b>124</b>
7.1	Johdanto.....	124
7.2	Biokaasun koostumus ja ominaisuudet.....	127
7.3	Puhdistus ja jälkikäsittely .....	130
7.3.1	Puhdistus.....	131
7.3.2	Jälkikäsittely ja poikkeustilanteet .....	133
7.4	Jalostus.....	134
7.4.1	Fysikaalinen absorptio .....	139
7.4.1.1	Vesipesu.....	140
7.4.1.2	Kemikaalipesu .....	143
7.4.2	Kemiallinen absorptio .....	144
7.4.3	Fysikaalinen adsorptio .....	145
7.4.4	Kryojalostus .....	147
7.4.5	Kalvojalostus .....	149

7.5	Biokaasun käyttö lämmityksessä.....	150
7.6	Biokaasun käyttö sähkön tuotannossa.....	152
	7.6.1 ECE- ja ECT-lämpövoimakoneet sekä kombivoimalat....	154
	7.6.2 ICE- ja ICT-lämpövoimakoneet.....	156
	7.6.3 Polttokennot.....	157
7.7	Biokaasun käyttö liikennepolttoaineena .....	158
7.8	Biokaasun muu energiakäyttö .....	161
7.9	Sivutuotteet ja muut käyttösovellukset .....	163
7.10	Biokaasun kuljetus.....	164
	7.10.1 Putkikuljetus .....	165
	7.10.2 Kuljetus paineistettuna (CBG) ja nesteytettynä (LBG).....	167
7.11	Biokaasun varastointi .....	168
	7.11.1 Varastointi kaasumaisessa olomuodossa .....	169
	7.11.2 Varastointi nestemäisessä olomuodossa .....	171
	7.11.3 Varastointi kiinteään väliaineeseen.....	171
<b>8.</b>	<b>Biokaasulaitostoihintaan liittyviä ympäristönäkökohtia .....</b>	<b>173</b>
8.1	Hajujen hallinta ja hajukaasujen käsittely .....	173
8.2	Hule- ja jätevedet.....	176
8.3	Muut päästöt .....	177
8.4	Viranomaisvalvonta ja omavalvonta .....	178
<b>9.</b>	<b>Lainsäädäntö ja toiminnan vaatimat luvat.....</b>	<b>181</b>
9.1	Ympäristövaikutusten arviointimenettely (YVA) .....	181
9.2	Ympäristölupa.....	182
9.3	Rakennuslupa .....	183
9.4	Laitoshyväksyntä .....	183
9.5	Lannoitekäytössä huomioitava lainsäädäntö.....	184
9.6	Tuotehyväksyntä.....	186
9.7	Kemikaalilain mukainen ilmoitus/lupa.....	187
<b>10.</b>	<b>Biokaasualan historia ja tulevaisuus .....</b>	<b>190</b>
10.1	Biokaasualan historiaa.....	190
	10.1.1 Globaali katsaus.....	190
	10.1.2 Kehitys Suomessa .....	190
10.2	Biokaasualan tulevaisuudesta .....	191
	10.2.1 Prosessin optimointi .....	193
	10.2.2 Nykyisten jäteresurssien tehokkaampi hyödyntäminen ....	193
	10.2.3 Uusien resurssien käyttöönotto .....	194
	10.2.4 Sivutuotevalikoiman laajentaminen .....	195
	10.2.5 Termisten tuotantomenetelmien käyttöönotto.....	195
	10.2.6 Muiden uusiutuvien energiaresurssien käyttöönotto .....	196
	<b>Lyhenteet.....</b>	<b>199</b>
	<b>Kirjoittajat .....</b>	<b>203</b>

## Johdanto

Ihmisen toiminnan seurauksena luonnon kiertokulku ja sen myötä luonnollinen ravinnekierto on häiriintynyt. Muun muassa vesistöjen rehevöityminen ja happamoituminen ovat seurausta typen häiriintyneestä kierrosta. Fosfori, joka on tärkeä kasvinravinne ja näin ruuantuotannon edellytys, uhkaa loppua maailmasta ennen öljyä. Fosforivarojen ehtyessä fosforin hinta tulee nousemaan. Lisäksi keinolannoitteiden valmistus kuluttaa paljon energiaa. Käytössä olevat arvokkaat ravinteet onkin saatava talteen ja kiertoon, uudelleenkäytettäväksi. Tähän tähdätään laajalla rintamalla, kun Suomesta ollaan tekemässä ravinnekierrätyksen mallimaata v. 2020.

Energiatuotannon päästöjä voidaan hillitä korvaamalla fossiilisia polttoaineita uusiutuvilla. Samalla parannetaan huoltovarmuutta ja vaihtotasetta, kun tuontipolttoaineita korvataan kotimaisilla. Liikenne- ja viestintäministeriön asettama työryhmä esitti vuonna 2013, että vuoden 2050 tavoitetilassa henkilöautoliikenne olisi lähes täysin riippumaton öljystä. Lisäksi nestemäisten ja kaasumaisten biopolttoaineiden tavoiteltava osuus raskaassa liikenteessä olisi vähintään 70 %.

Biohajoavien jätteiden kaatopaikkakiellon myötä biohajoavia jätteitä tulee ohjautumaan entistä enemmän laitospöytä käsittelyn piiriin. Biohajoavia jätteitä ja lietteitä muodostuu yhdyskunnissa, jätevedenpuhdistamoilla, maataloudessa ja teollisuudessa. Suuri osa näistä materiaaleista on kosteita ja täten huonosti termiseen energiahyödyntämiseen, kuten polttoon, soveltuvia. Jätehierarkiainkin mukaisesti nämä jätteet on ensisijaisesti hyödynnettävä materiaana. Tämä on myös välttämätöntä, jotta voidaan saavuttaa materiaalikierrätykselle asetetut tavoitteet.

Biokaasuteknologia tarjoaa yhden ratkaisun kaikkiin yllä esitettyihin kolmeen globaaliin haasteeseen. Biokaasuteknologia mahdollistaa ravinnekierrätyksen, tuottaa uusiutuvaa energiaa ja edistää materiaalikierrätystä. Biokaasuteknologiaa voi soveltaa hyvinkin eri mittakaavassa, lähtien maatilatason ratkaisusta jopa sata tuhatta tonnia vuodessa käsitteleviin biokaasulaitoksiin. Biokaasuteknologiaa voidaan myös integroida osaksi erilaisia tulevaisuuden biojalostamokonsepteja, jolloin raaka-aineet saadaan maksimaalisesti hyödynnettyä. Biokaasuteknologiaa

voidaankin pitää yhtenä keskeisenä kiertotalouden mahdollistavana ratkaisuna.

Biokaasuteknologia on monipuolinen, laaja ja monialainen aihealue. Biokaasun tuotanto on biologinen prosessi, anaerobinen eli hapeton hajotusprosessi (AD, Anaerobic Digestion, -prosessi). Biokaasuteknologian soveltamisessa vaaditaan mikrobiologisen ymmärryksen lisäksi myös teknistä osaamista: prosessitekniikkaa, laitetekniikkaa, mittaus- ja automaatio-osaamista, ja siihen liittyvää prosessin operointiparametrien hallintaa. Käytännössä tarvitaan myös raaka-aineiden soveltuvuuteen ja lopputuotteiden, sekä biokaasun että mädätysjäännöksen, hyödyntämiseen liittyvää osaamista. Lisäksi biokaasuteknologian parissa työskentelevän on tunnettava alaan vaikuttavaa lainsäädäntöä ja poliittista ohjausta. Tämän kirjan tavoitteena on antaa lukijalle tietoa näistä kaikista keskeisistä biokaasuteknologian soveltamiseen liittyvistä osa-alueista.



# 1. Biokaasualan monet mahdollisuudet

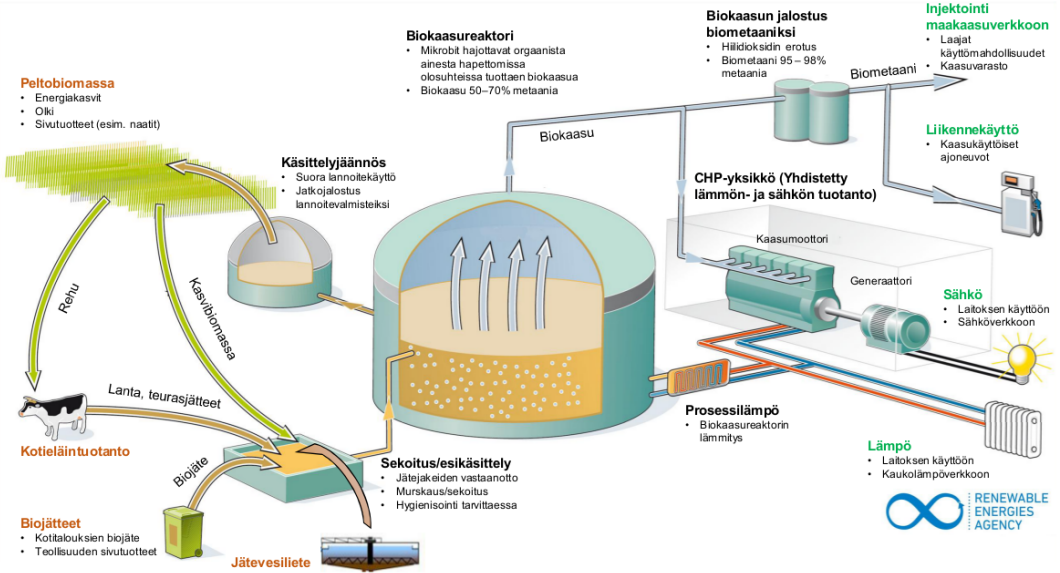
Viljami Kinnunen ja Jukka Rintala

Tässä luvussa esitellään yleisesti biokaasuteknologian tarjoamia monipuolisia mahdollisuuksia liittyen jätteiden, sivutuotteiden ja jätevesien käsittelyyn, energian ja liikennebiopolttoaineiden tuotantoon sekä ravinnerierrätykseen. Luvussa muistutetaan myös tekijöistä, jotka ovat tärkeitä teknologian pitkäjänteisille onnistuneille sovelluksille. Kirjan muissa luvuissa näihin osa-alueisiin perehdytään yksityiskohtaisemmin.

Biokaasualan historia on pitkä, metaania tuottavat mikro-organismit ovat vanhimpia tunnettuja elollisia organismeja maapallolla. Esimerkiksi sedimenteissä sekä soilla syntyvän palavan kaasun hyödyntämisestä on viitteitä jopa tuhannen vuoden takaa ja 1600-luvulla havaittiin kaasun muodostuvan hajoavasta orgaanisesta aineksestä. Tietävästi ensimmäinen varsinainen biokaasureaktori rakennettiin Intiassa 1800-luvun puolivälissä. Englannissa puolestaan aloitettiin jätevesien anaerobinen käsittely 1900-luvun taitteessa, hyödyntäen tuotettu biokaasu valaistukseen ja lämmitykseen. Samoihin aikoihin selvitettiin myös anaerobisen hajoamisen mikrobiologiset perusteet. Toisen maailmansodan aikaan biokaasua tuotettiin melko yleisesti maatalouden jätteistä Saksassa ja Ranskassa.

Huolimatta alan pitkästä historiasta, biokaasutuotannon yleistyminen on ollut hidasta. Suomessa tavallisimpia käytössä olevia sovelluksia ovat jätevedenpuhdistamolietteiden anaerobinen stabilointi eli lietteiden mädätys. Öljykriisien jälkeen 1970-luvulla Suomessakin investoitiin muuttamiin maatilakohtaisiin pienehköihin biokaasuprosesseihin. Osa niistä toimi hyvin, osasta teknologialle saattoi jäädä huono maine. Vuosikymmenien tutkimustyö ja kokeilut yhdessä ympäristö- ja energia-alojen muuttuneiden toimintaympäristöjen kanssa ovat viime vuosina johdaneet biokaasuteknologian nopeaan ja laajamittaiseen käyttöönottoon muutamissa maissa. Esimerkiksi Saksassa on yli 10 000 biokaasulaitosta ja Ruotsissakin pari sataa (2013). Saksassa valtaosa laitosten raaka-aineesta on varta vasten biokaasutuotantoon viljeltyä energiamaisia. Intiassa ja Kiinassa puolestaan on miljoonia perhekohtaisia biokaasureaktoreita. Kuvassa 1.1 on tiivistetty nykyaikaisen biokaasuprosessin rooli osana ravinneriერთa ja uusiutuvan energian tuotantoa: erilaisista raaka-aineista syntyy ravinneripitoista mädätysjäännöstä (käsittely-

jäännöstä) ja biokaasua erilaisiin käyttökohteisiin. Mädätysjäännöksestä käytetään yleisesti myös termiä käsittelyjäännös, mutta tässä kirjassa käytetään tästä edespäin termiä mädätysjäännös. Termi on yleistynyt käyttöön alan toimijoiden keskuudessa.



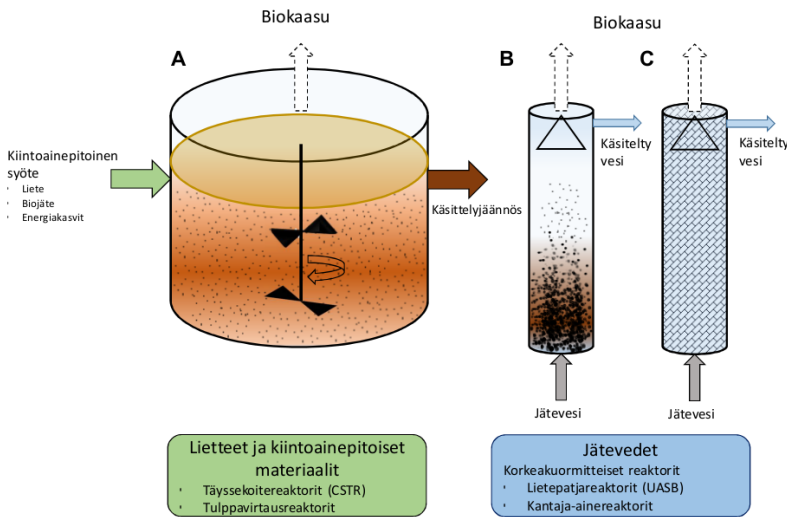
Kuva 1.1 Biokaasuprosessi osana ravinnekiertoa ja uusiutuvan energian tuotantoa. (Kuva käännetty suomeksi ja julkaistu Agentur für Erneuerbare Energien luvalla).

Biokaasuprosessin perustana toimivat mikro-organismit voivat käyttää metaboliaansa hyvin erilaisia orgaanisia yhdisteitä. Biokaasun tuotantoon soveltuvatkin monenlaiset materiaalit, kuten biojätteet, jätevedet, lannat sekä teollisuuden sivutuotteet. Suomessa suurin energiapotentiaali on kuitenkin peltobiomassassa (Tähti & Rintala 2010). Anaerobista hajoamista tapahtuu myös kaatopaikoilla, ja ne ovatkin merkittävä metaanin lähde. Koska metaani on myös voimakas kasvihuonekaasu, kerätään kaatopaikoilla syntyvä kaasu nykyisin talteen ja enenevässä määrin myös hyödynnetään energiana. Kaatopaikoille päätyvän biojätteen määrä on kuitenkin jo alkanut selvästi vähentyä mm. EU:n jätteiden hyötykäyttöä edistävien säädösten vuoksi. Tämän seurauksena kaatopaikkakaasun määrä laskee lähitulevaisuudessa.

Biokaasuprosessin lähtökohta voi olla jätteiden, lietteiden tai jätevesien käsittely, jolloin tärkeintä on saada käsiteltävät jätteet ympäristölle haitattomaan muotoon. Samalla käsittelyssä voidaan tuottaa energiaa ja kierrättää ravinteita. Toisaalta prosessin lähtökohta voi olla myös energiantuotanto, jolloin materiaalina käytetään usein erityisesti tarkoitusta varten kasvatettuja energiakasveja. Samalla kasvien ravinteet voidaan kier-

rättää takaisin energiakasvien tuotantoon. Nämä lähtökohdat on myös mahdollista yhdistää esimerkiksi kasvattamalla energiakasveja tai leviää hyödyntäen kasvatuksessa jätevirtojen ravinteita.

Raaka-aine ja prosessin tavoitteet vaikuttavat merkittävästi koko biokaasulaitoskonseptiin. Esimerkiksi jätevesille ja kiinteille materiaaleille käytettävät reaktorimallit ovat hyvin erilaisia. Kiintoainepitoisten jätteiden käsittelyssä käytetään usein täyssekoitus- tai tulppavirtausreaktoria, kun taas jätevesien käsittelyssä käytetään erilaisia korkeakuormitteisia reaktoreita. Näiden reaktorityyppien toimintaperiaatteen eroavaisuudet on esitetty Kuvassa 1.2. Seuraavissa alaluvuissa käsitellään biokaasuprosesseja erikseen kiinteiden jätteiden, jätevesien ja peltobiomasojen osalta.



Kuva 1.2

Kiintoainepitoisille materiaaleille ja jätevesille käytettävien biokaasureaktoreiden eroavaisuudet. A: Täyssekoitteisissa reaktoreissa (CSTR = completely stirred tank reactor) reaktorin sisältö on tasaisesti sekoittunut ja anaerobisten mikro-organismien viipymäaika (usein noin 20–40 vrk) reaktorissa on sama kuin käsiteltävällä materiaalilla. B: Lietepatjareaktoreissa, kuten UASB (= upflow anaerobic sludge blanket) -reaktorissa anaerobiset mikro-organismit muodostavat laskeutuvia granuloita, jotka säilyvät reaktorissa huomattavasti käsiteltävää jätevettä pidempään. C: Täyteainellisissa, ns. kantaja-ainereaktoreissa, mikro-organismit ovat kiinnittyneinä reaktorin sisällä olevaan kantaja-aineeseen jolloin niiden viipymäaika reaktorissa on selvästi jätevettä pidempi.

## 1.1 Biokaasuteknologia jätteiden ja sivutuotteiden käsittelyssä

Teollisuudessa, maataloudessa ja yhdyskunnissa muodostuu runsaasti erilaisia orgaanisia sivutuotteita ja jätteitä, joiden tehokas hyödyntäminen on yhä puutteellista. Osa näistä materiaaleista on perinteisesti

kompostoitu ja osa sijoitettu kaatopaikoille. Lainsäädännön kiristyminen kannustaa biohajoavien jätteiden hyötykäyttöön, jolloin käsittelyvaihtoehdot ovat yleensä biokaasuprosessi, poltto, kaasutus tai kompostointi. Tulevaisuudessa orgaanisista jättemateriaaleista voivat kilpailla myös muut teknologiat. Jo nyt biojätteestä valmistetaan etanolia ja mm. ravintoloiden jäteöljyistä uusiutuvaa dieseliä.

Kestävä kehitys edellyttää paitsi jätteiden synnyn ehkäisyä, myös materiaalivirtojen tehokasta hallintaa kierrätyksen edistämiseksi. Kierrätyksen osana voi olla myös sivutuotteiden ja jätteiden energiasisällön hyödyntäminen. Poltettaessa biojätettä menetetään useimmiten mahdollisuus ravinteiden hyötykäyttöön, sillä typpi muuntuu palaessa  $\text{NO}_x$ -päästöiksi savukaasun mukana. Fosfori, kalium sekä muut ravinteet puolestaan päätyvät tuhkaan, joka jätteen sekapoltossa sisältää usein raskasmetalleja joiden vuoksi hyödyntäminen voi olla hankalaa. Etenkin yhdyskuntien biojäte on yleensä varsin märkää, minkä seurauksena lämpöarvo on alhainen. Biojätteen energiantuotto biokaasuprosessissa voikin olla jopa 60 % suurempi kuin suorassa poltossa. Suomessa on (v. 2015) käytössä n. 15 yhdyskuntabiojätteitä käsittelevää biokaasulaitosta, joiden käsittelykapasiteetit ovat tyypillisesti n. 20 000–80 000 tonnia vuodessa. Kuvassa 1.3 on käsittelykapasiteetiltaan kaksi Suomen suurinta biokaasulaitosta, Envor Biotech Oy:n laitos Forssassa ja Jepuan Biokaasu Oy:n laitos Uudessakaarlepyyssä.



Kuva 1.3 Yhdyskuntabiojätteitä, lietteitä ja teollisuusbiojätteitä käsittelevä Envor Biotech Oy:n laitos Forssassa. Kuva: Envor Biotech (vasemmalla). Sianlietettä ja teollisuuden biohajoavia jätteitä käsittelevä Jepuan Biokaasu Oy:n laitos Uudessakaarlepyyssä. Kuva: Outi Pakarinen (oikealla).

Biokaasun tuotannossa kiinnostavia materiaaleja ovat eloperäiset biohajoavat sivutuotteet ja jätteet. Näitä biokaasutuotannossa hyödynnettäviä jätteitä ja sivutuotteita käsitellään tämän kirjan Luvussa 2. Tuotetun energian lisäksi keskeistä on kierrättää niiden sisältämiä ravinteita kasvin tuotantoon. Ravinteiden kierrätys on mahdollista myös kompostoinnissa, mutta päinvastoin kuin anaerobinen käsittely, kompostointi kuluttaa energiaa.

Sivutuotteiden ja jätteiden energiahyödyntämiseen voidaan käyttää lukuisia erilaisia bioteknisiä ja kemiallisia prosesseja. Erilaisista biohajoavista jätteistä voidaan tuottaa esimerkiksi metaania, vetyä ja bioetanolia biologisilla prosesseilla tai biodieseliä kemiallisesti. Tietyn materiaalin hyödyntämiseen parhaiten soveltuvan menetelmän valintaan vaikuttavat useat tapauskohtaiset tekijät. Menetelmiä voidaan verrata esimerkiksi koko tuotantoketjujen elinkaaritarkasteluilla ja energiataseilla. Pidemmällä aikavälillä ympäristön kannalta kestävimpien energiaratkaisujen tulisi yleistyä, vaikka ne eivät tällä hetkellä olisikaan taloudellisesti kannattavimpia. Käyttöönottoon voidaan vaikuttaa erilaisilla ohjauksilla toimilla.

## 1.2 Biokaasuteknologia jätevesien käsittelyssä

Teollisuuden ja yhdyskuntien jätevedet käsitellään yleisesti aerobisella aktiivilieteprosessilla, joka vaatii ilmastusta ja tuottaa runsaasti ylijäämälietettä. Biokaasuteknologian rooli jätevesien käsittelyssä onkin ollut nimenomaan suurimpien yhdyskuntajätevedenpuhdistamoiden aktiivilieteprosessissa syntyneen jätevesilietteen stabiloinnissa (Kuva 1.4).



Kuva 1.4 Jäteveden aerobinen käsittely eli aktiivilieteprosessin ilmastusvaihe (vasemmalla), ja prosessissa muodostuvan lietteen käsittely lietemädättämössä (oikealla). Kuvat: Maritta Kymäläinen.

Jätevesiä voidaan kuitenkin käsitellä myös suoraan anaerobisesti, jolloin jäteveden orgaanisesta aineksesta tuotetaan biokaasua. Anaerobisten jätevedenkäsittelytekniikoiden käyttö yleistyi erityisesti väkevien ja lämpimien teollisuusjätevesien käsittelyssä maailmalla 1980-luvulla. Aiemmin jätevesien käsittelyssä käytettiin lähinnä anaerobisia lammikoita. Uusien sovellusten yleistymisen mahdollisti anaerobisen hajoamisprosessin parantunut tuntemus ja korkeakuormitteisten anaerobireaktoreiden

kehittäminen. Korkeakuormitteisten anaerobiprosessien reaktorirakenteet ovat huomattavasti pienempiä kuin konventionaalisten täyssekoitusreaktoreiden, mikä merkittävästi alentaa investointikustannuksia. Yhdyskuntajätevesien käsittelyyn anaerobisia menetelmiä on toistaiseksi sovellettu lähinnä lämpimillä ilmastoalueilla kuten esim. Etelä-Amerikassa ja Intiassa. Prosessin toiminta hidastuu huomattavasti alhaisissa lämpötiloissa, minkä vuoksi sovellukset ovatkin lähinnä lämpimille jätevesille.

Jätevesien käsittelyn biokaasuteknologia, erityisesti reaktorityyppi, poikkeaa kiinteiden materiaalien käsittelyyn käytettävistä reaktoreista. Tässä kirjassa keskitytään jatkossa tarkastelemaan biokaasuteknologiaa nimenomaan kiintoainepitoisten materiaalien (jätteet, lietteet, sivutuotteet, lanta, peltobiomassat) kannalta, ja jätevesien käsittelyyn liittyvien ominaispiirteiden esittely on tiivistetyksi tässä luvussa.



Kuva 1.5 Apetit Suomen hallinnoima Länsi-Säkylän teollisuusalueen prosessi- ja jätevesiä käsittelevä IC-reaktorilaitos. Kuva: Watrec Oy.

Jätevesille suunniteltuja anaerobisia reaktoreita on kahta perustyyppiä (Kuva 1.2). Täyteaineellisissa eli kantaja-aineellisissa reaktoreissa on täyteaine (kantaja-aine), jonka pinnalle ja/tai väleihin biomassa pidättyy. Täyteaineellisia reaktoreita ovat esim. suodin- ja leijupetireaktori. Täyteaineettomissa reaktoreissa bakteerit muodostavat lieteflokkeja tai -granuloita, jotka pysyvät reaktorissa (esim. lietepatjareaktori, UASB) tai jotka voidaan selkeyttää erillisessä selkeyttimessä ja palauttaa takaisin prosessiin (kontaktiprosessi). Jätevesien orgaanisen aineksen määrää mitataan analysoimalla jäteveden kemiallinen hapen kulutus, COD (chemical oxygen demand, ks. 2.1.3). Reaktorin kuormitusta taas mitataan sillä, kuinka paljon orgaanista ainesta reaktoriin syötetään sen tilavuutta ja

aikayksikköä ( $\text{kgCOD}(\text{m}^3\text{vrk})^{-1}$ ) kohti. Lietepatjareaktori (UASB) ja sen uudet modifikaatiot eli IC- (internal recirculation; Kuva 1.5) ja EGSB (expanded granular sludge bed) reaktori edustavat korkeakuormitteista reaktoria, eli niihin voidaan syöttää paljon orgaanista ainesta reaktoritilavuutta kohti. Lietepatjareaktoreissa kuormitukset ovat yleensä yli 5–10  $\text{kgCOD}(\text{m}^3\text{vrk})^{-1}$  ja sen modifikaatioissa jopa 20–30  $\text{kgCOD}(\text{m}^3\text{vrk})^{-1}$ . Muissa prosesseissa, kuten kontaktiprosessissa, kuormitus jää yleensä alle 5  $\text{kgCOD}(\text{m}^3\text{vrk})^{-1}$ .

Jätevesien anaerobisessa hajoamisessa suurin osa yhdisteen energiasällöstä vapautuu metaanina, ja biomassaa muodostuu vain vähän, ylijäämälietteen tuotto anaerobikäsittelyssä on yleensä 10–20 % tavanomaisen aerobisen prosessin tuotosta. Esimerkiksi glukoosin energia-arvosta muuntuu aerobisessa hajoamisessa lämmöksi noin 41 % ja biomassaksi noin 49 %, kun anaerobisessa hajoamisessa glukoosin energia-arvosta noin 90 % muuttuu metaaniksi. Jätevesien anaerobikäsittelyssä metaania muodostuu yleensä 0,1–0,33  $\text{m}^3\text{CH}_4(\text{kgCOD}_{\text{poistettu}})^{-1}$ , vastaten energiana 1,0–3,3  $\text{kWh}(\text{kgCOD}_{\text{poistettu}})^{-1}$ .

Taulukossa 1.1 on eräitä yleisiä näkemyksiä anaerobisten käsittelyprosessien ominaisuuksista verrattuna aerobisiin menetelmiin teollisuusjätevesien käsittelyssä. Esitettyjen tekijöiden lisäksi tulee huomioida menetelmien kyky hajottaa ympäristölle haitallisia yhdisteitä vähemmän haitalliseen muotoon.

Taulukko 1.1 Anaerobisen jäteveden käsittelyn edut ja haitat konventionaaliseen aerobiseen käsittelyyn verrattuna.

Edut	Haitat
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Metaanin tuotto</li> <li>• Ei energiaa ilmastukseen</li> <li>• Vähäinen ylijäämälietteen tuotto</li> <li>• Korkea kuormitettavuus</li> <li>• Vähäinen ravinteiden tarve</li> <li>• Lietteen pitkäaikainen varastointi ilman huomattavaa aktiivisuuden alenemista</li> <li>• Rikin talteenotto ja kierrätys mahdollista</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Herkkä inhiboiville yhdisteille</li> <li>• Hidas käynnistys, ellei adaptoitua ympiä ole saatavilla</li> <li>• Vaatii jatkokäsittelyn (usein aerobinen), mm. ammoniumtypen hapettamiseksi</li> </ul>

Koska biomassan tuotto anaerobiprosessissa on alhaisempi kuin aerobiprosessissa, on myös fosforin ja typen tarve alhaisempi. Tästä toisaalta seuraa, että näiden ravinteiden poistoteho on alhainen. Anaerobisten mikro-organismien kuolemiskerroin on huomattavasti pienempi kuin aerobisten. Ne tulevatkin toimeen pitkiäkin aikoja ilman ravintoa,

joten prosessit soveltuvat hyvin esimerkiksi kausiluonteisesti muodostuvien elintarviketeollisuuden jätevesien käsittelyyn. Toisaalta, hitaammas- ta mikro-organismien kasvusta johtuen anaerobiprosessi myös käynnisty- ty hitaammin ja inhiboivien yhdisteiden tai shokkikuormien vaikutus voi olla suurempi kuin aerobiprosessiin.

### 1.3 Biokaasua peltobiomassoista

Pelkästään nykyisen energian kokonaiskulutuksen näkökulmasta ajatellen jätetehojaisen biokaasun potentiaali on pienehkö, johtuen jätteiden ra- jatusta ja suhteellisen vähäisestä määrästä. Monissa maissa huomattavas- ti suurempi energiapotentiaali onkin peltobiomassassa. Käytännössä pel- tobiomassan potentiaali riippuu paljolti tuotantoon käytettävissä olevasta peltopinta-alasta. Peltobiomassasta voitaisiin Suomessa tuottaa metaania jopa 20 – 40 MWh hehtaarilta (Pakarinen 2011), kun vertailuna puu kas- vaa Suomessa parhaimmillaan vain vajaa 10 MWh hehtaaria kohti vuodes- sa. Esimerkiksi Saksassa tuotettiin peltobiomassasta ja lannasta peräisin olevasta biokaasusta sähköä ja lämpöä v. 2014 yhteensä 41 TWh (IEA Bio- energy). Ylivoimaisesti suurin osa biokaasusta Saksassa tuotettiin energia- maissista, jota viljellään yli miljoonan hehtaarin peltopinta-alalla.

Kun biokaasun tuotannon raaka-aineena käytetään peltobiomassaa, on tärkeää huomioida koko tuotantoprosessin elinkaaren ympäristövaiku- tukset ja energiataseet eli tuotannon kestävyys. Tällöin merkittäviksi tekijöiksi nousevat peltobiomassan tuotannon kasvihuonekaasupäästöt ja energiankulutus. Vaikka peltobiomassasta liikennekäyttöön tuotettu bio- metaani on useimmissa vertailuissa ollut energiataseeltaan ja kasvihuo- nekaasupäästöiltään parhaasta päästä verrattuna esimerkiksi biodieseliin ja bioetanoliiin, ovat taseet aina tapauskohtaisia. Jos energiakasvin vilje- ly tai kuljetus kuluttaa runsaasti energiaa, voivat taseet ja taloudellisuus kääntyä epäsuotuisaksi. Lisäksi taloudelliseen kannattavuuteen vaikut- tavat merkittävästi poliittiset ohjauskeinot, kuten mahdolliset tuet, jotka voivat pitkällä aikavälillä vaihdella merkittävästikin.

EU kiinnittää erityistä huomiota liikenteen biopolttoaineiden kestävyteen, mikä koskee luonnollisesti myös biokaasua. Liikenteen biopolttoaineiden tulee täyttää EU:n asettamat kestävyyskriteerit. Syksyllä 2015 hyväksytty ns. ILUC-direktiivi (EU 2015/1513) rajoittaa perinteisten, ruokaraaka-aineisiin perustuvien biopolttoaineiden määrän siten, että laskettaessa liikenteen 10 %:n uusiutuvan energian osuusvaatimusta perinteisten biopolttoai- neiden osuus voi olla enintään 7 % liikenteen energian loppukulutuksesta. Direktiivin liitteessä IX on lueteltu raaka-aineet, joita ei lasketa tähän 7 %:n rajaan. Esimerkiksi oljesta valmistettuja biopolttoaineita ei lasketa tähän kuuluvaksi, vaan sen sijaan ne saavat ns. tuplalaskennan. ILUC-direk- tiivin noudattamisen edellyttämät lait, asetukset ja hallinnolliset määrä- ykset tulee saattaa voimaan viimeistään 10. syyskuuta 2017. Ajantasaista



tietoa kestävyyskriteereistä ja ILUC-direktiivistä saa energiavirastosta ([www.energiavirasto.fi](http://www.energiavirasto.fi)).

Biokaasutuotantoon soveltuvia peltobiomassoja käsitellään tämän kirjan luvussa 2.3 ja niiden prosessointia luvuissa 3.1 ja 5.

## 1.4 Biokaasun hyödyntäminen

Biokaasuprosessissa tuotetussa biokaasussa on noin 50–70 % metaania, lopun ollessa pääosin hiilidioksidia. Biokaasu on monipuolinen uusiutuva energiamuoto, jota voidaan käyttää sähkön- ja/tai lämmöntuotantoon paikan päällä tai jalostaa liikennepolttoaineeksi soveltuvaksi biometaaniksi. Biokaasun jalostus biometaaniksi tarkoittaa käytännössä hiilidioksidin ja epäpuhtauksien poistoa, jolloin metaanipitoisuus nostetaan tyypillisesti noin 95–98 %:iin. Sivutuotteena saatava hiilidioksidia voidaan hyödyntää esimerkiksi kasvihuoneiden lannoitteena. Tuotetun biokaasun käyttövalla on huomattava merkitys biokaasukonseptin taloudellisuuteen sekä energia- ja kasvihuonekaasupäästötaseisiin. Biokaasu on perinteisesti käytetty lämmön ja sähköntuotantoon paikan päällä CHP-laitoksissa (combined heat and power), mutta biometaaniksi jalostus on viime vuosina yleistynyt. Biometaanin yhtenä etuna on mahdollisuus injektoida se kaasuverkkoon, joka toimii samalla kaasuvartona ja laajentaa biometaanin käyttömahdollisuuksia esimerkiksi teollisuuskohteissa.

Biokaasulla korvataan usein fossiilisia energialähteitä, jolloin yleensä saavutetaan merkittävästi alhaisemmat kasvihuonekaasupäästöt. Biokaasusta tuotettu energia voi muodostaa huomattavan osuuden energiankulutuksesta yksittäisellä toimijalla, kuten jätevedenpuhdistamolla, jätteenkäsittelylaitoksella tai maatilalla. Kuitenkin CHP-laitoksissa muodostuvan lämmön hyödyntäminen on usein vaikeaa erityisesti kesäisin. Koska lämpö muodostaa usein 60–70 % CHP-laitoksissa tuotetusta energiasta, sen hukkaaminen heikentää koko prosessin energia- ja kasvihuonekaasutaseita.

Biokaasusta puhdistettu ja jalostettu biometaanin soveltuu sellaisenaan kaasukäyttöisten ajoneuvojen polttoaineeksi, jolloin lähes koko metaanin energiasisältö saadaan hyödynnettyä, ajoneuvon polttomoottorin hyötysuhteella. Jäteperäinen biometaanin on useissa tutkimuksissa havaittu elinkaaritarkastelussa niin kasvihuonekaasupäästöiltään kuin energiataseeltaan parhaaksi biopolttoaineeksi. Kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisen lisäksi biometaanin liikennekäytön etuna ovat lähes olemattomat hiukkaspäästöt verrattuna perinteisiin polttoaineisiin. Biometaanin liikennekäyttö on yleistynyt nopeasti Ruotsissa, jossa yli 50 % tuotetusta biokaasusta jalostetaan liikennekäyttöön lähes 50 000 kaasukäyttöiselle ajoneuvolle (2013). Useimmilla ajoneuvovalmistajilla on

mallistossaan kaasukäyttöisiä ajoneuvoja, yleensä niin kutsuttuja bi-fuel-ajoneuvoja, jotka voivat käyttää myös perinteisiä nestemäisiä polttoaineita.

Biokaasun jalostukseen on olemassa useita erilaisia teknologioita, jotka ovat sovellettavissa eri kokoluokan biokaasuntuotantolaitoksiin. Yleensä biometaani paineistetaan jalostuksen yhteydessä (CBG, compressed biogas), mutta siitä on mahdollista valmistaa myös nesteytettyä biokaasua (LBG, liquified biogas), jolloin energiatiheys kasvaa ja kuljetuskustannukset laskevat. Teknologioita kehitetään edelleen tavoitteena pienentää jalostuksen kustannuksia ja päästöjä.

Koska biometaani ei poikkea kaasuverkossa siirrettävästä kaasusta (pääasiassa fossiilista maakaasua), voidaan se myös injektoida kaasuverkkoon, jolloin tankkauspiste voi sijaita verkoston alueella. Kaasuverkon avulla tankkausasemien verkostoa onkin helpompi laajentaa. Kaasuverkko myös monipuolistaa biometaanin käyttökohteita, sillä metaania käytetään myös muun muassa kemianteollisuuden raaka-aineena. Biometaanin tankkausasema voi sijaita myös suoraan biokaasulaitoksen läheisyydessä, jos kaasuverkkoa ei alueella ole. Lisäksi kaasun siirtoon kauempana sijaitseville tankkausasemille on olemassa erilaisia vaihtoehtoja.

Biokaasun hyödyntämistä tarkastellaan tarkemmin kirjan luvussa 7.

## 1.5 Mädätysjäännöksen hyödyntäminen

Biokaasun lisäksi anaerobiprosessi tuottaa mädätysjäännöstä, joka koostuu pääosin hajoamattomasta materiaalista sekä prosessissa muodostuneesta mikrobibiomassasta. Biokaasuprosessin syötteenä käytettyjen materiaalien sisältämät ravinteet, tärkeimpinä typpi, fosfori ja kalium ovat mädätysjäännöksessä. Anaerobiprosessissa osa ravinteista muuntuu liukoisiin, kasveille helpommin hyödynnettäviin muotoihin. Mädätysjäännös soveltuukin käytettäväksi lannoitteena ja maanparannusaineena. Mädätysjäännöstä voidaan myös edelleen prosessoida korkeamman jalostusasteen lannoitevalmisteiksi esimerkiksi erottamalla neste- ja kiintoainekaset tai erottamalla mädätysjäännöksestä ammoniakkaa.

Hyödyntämällä biokaasuprosessin mädätysjäännöksen ravinteet pystytään paitsi edistämään ravinteiden kierrätystä, myös saavuttamaan huomattavia energiansäästöjä ja ympäristöetuja, mikäli tällä korvataan epäorgaanisia lannoitteita. Erityisesti typpilannoitteiden valmistaminen Haber–Bosch-menetelmällä on energiaintensiivinen prosessi, jossa ilmakehän typpi muutetaan ammoniakiksi korkeassa lämpötilassa. Toisaalta, lannoitteista peräisin olevat ravinteet päätyvät biojätteisiin ja jätevesiin, joista ne nykyisin käytössä olevilla aerobisilla käsittelymenetelmillä pääosin menetetään ja, lisäksi, nämä käsittelymenetelmät kuluttavat merkittävästi energiaa.

Mädätysjäännöksen käyttöön ja prosessointiin tutustutaan yksityiskohdaisemmin kirjan luvussa 6.

## 1.6 Biokaasutuotannon tukeminen Suomessa

Uusiutuvan energian tuotantoa pyritään edistämään erilaisilla ohjauksilla toimilla. Yksi tapa tähän on syöttötariffi. Siinä tuotetulle sähkölle taataan vähimmäishinta tietyksi ajaksi ja valtio maksaa erotuksen suhteessa markkinahintaan. Suomessa syöttötariffi otettiin käyttöön maaliskuussa 2011. Kolmessa vuodessa biokaasulaitosten syöttötariffia oli maksettu kahdelle biokaasulaitokselle yhteensä n. 0,2 miljoonaa euroa, kun samaan aikaan puupohjaiselle bioenergialle maksettiin 84,4 miljoonaa euroa ja tuulivoimalle 56,5 miljoonaa euroa (Energiavirasto 2014). Syöttötariffille vaihtoehtoinen tukimuoto on investointituki, jota myönnettä MMM maatalouden laitoksille ja TEM muille biokaasulaitoksille.

Sipilän hallitusohjelman mukaan tavoitteena on lisätä päästötöntä, uusiutuvaa energiaa kestävästi niin, että sen osuus 2020-luvulla nousee yli 50 prosenttiin, ja energiaomavaraisuus nousee yli 55 prosenttiin. Tavoitteeksi asetettiin nostaa myös liikenteen uusiutuvien polttoaineiden osuus 40 prosenttiin vuoteen 2030 mennessä. Lisäksi tavoitteena on luopua kivihiilen käytöstä energiantuotannossa ja puolittaa tuontiöljyn käyttö kotimaan tarpeisiin 2020-luvun aikana. Työ- ja elinkeinoministeriö on marraskuussa 2015 asettanut työryhmän, jonka tehtävänä on laatia ehdotus uusiutuvan energian tukijärjestelmäksi. Työryhmän tehtävänä on harkita, täyttääkö investointitukeen, tuotantotukeen vai vihreisiin sertifikaatteihin perustuva malli parhaiten uudelle tukijärjestelmälle asetetut tavoitteet. Työ- ja elinkeinoministeriö on joulukuussa 2015 lähettänyt lausunnolle valtioneuvoston asetusluonnoksen uusiutuvan energian ja uuden energiateknologian investointituesta. Nämä muutokset tukijärjestelmissä tulevat luonnollisesti vaikuttamaan myös biokaasulaitosinvestointeihin ja biokaasun liikennekäyttöön.

## LÄHTEET JA LISÄTIETOA

- Abbasi, T., Tauseef, S. ja Abbasi, S. 2012. Biogas Energy. SpringerBriefs in Environmental Science. Springer 2012. 169 p.
- Energiavirasto. [www.energiavirasto.fi](http://www.energiavirasto.fi)
- IEA Bioenergy. IEA Bioenergy Task 37 - Country Reports Summary 2014. 2015 IEA Bioenergy. *Linkki e-julkaisuun.*
- Pakarinen, O. 2011. Methane and hydrogen production from crop biomass through anaerobic digestion. Jyväskylä Studies in Biological and Environmental Science 229. 96 s + Liitteet. *Linkki e-julkaisuun.*
- Tähti, H. ja Rintala, J. 2010. Biometaanin ja -vedyn tuotantopotentiaali Suomessa. Jyväskylän yliopiston Bio- ja ympäristötieteiden tiedonantoja 90. 53 s. *Linkki e-julkaisuun.*
- Wellinger, A., Murphy, J. ja Baxter, D. (Eds.) 2013. The biogas handbook. Science, production and applications. IEA Bioenergy. Woodhead Publishing Ltd. Philadelphia. USA. 508 p.

## 2. Biokaasutuotannon raaka-aineet

Maritta Kymäläinen (luvut 2.1 – 2.2, 2.4 – 2.6) ja Sari Luostarinen (luku 2.3)

Biokaasun tuotanto on biologinen prosessi, joka käyttää pääraaka-aineenaan orgaanista ainesta. Raaka-aineeksi eli substraatiksi soveltuvat hyvin erilaiset biomassat, sisältäen laajasti mm. maatalouden, yhdyskunnan ja teollisuuden erilaisia sivutuotteita ja jätteitä. Tyypillisesti raaka-aineessa on paljon ns. helposti biohajoavaa ainesta, kuten hiilihydraatteja, proteiineja ja rasvoja, jotka hajoavat suhteellisen nopeasti tuotteen hapettomissa eli anaerobisissa olosuhteissa biokaasua. Puu, sisältäen vaikeasti hajoavaa orgaanista ainesta, ei sellaisenaan sovellu biologisen biokaasuprosessin raaka-aineeksi. Ylipäätään sopivimpia ja kestävimpiä raaka-aineita biokaasutuotantoon ovat biomassan erilaisissa jalostusketjuissa syntyvät jätteet ja sivutuotteet. Lisäksi vesistöjen ja vesikasvatuksen mahdollisuuksia raaka-ainetuotannossa tutkitaan yhä enemmän. Esimerkkinä levät biomassalähteenä tarjoavat kestävän vaihtoehdon energiakasveille, sekä mahdollisuuden yhdistää biokaasutuotanto biodieseliä ja erilaisia arvojakeita tuottavaan leväbiojalostamoon.

Orgaanisen aineen hyvän ja tasapainoisen anaerobisen hajoamisprosessin (AD, Anaerobic Digestion) eli biokaasun tuotannon edellytyksenä on sopivat reaktoriolosuhteet, joihin suurelta osin vaikutetaan syötekoostumuksen kautta. Olosuhdevaatimuksia tarkastellaan tarkemmin pääluvussa 4, mutta tässä luvussa (luku 2.1) tuodaan esiin joitakin syöteominaisuuksia, joihin on syytä kiinnittää huomiota arvioitaessa syötteen ja syöteseosten sopivuutta biokaasutuotantoon.

Raaka-aineesta saatava biokaasutuotto ja biokaasun metaanipitoisuus vaihtelevat riippuen raaka-aineen koostumuksesta. Eri orgaaniset yhdisteet (hiilihydraatit, proteiinit jne.) tuottavat hajotessaan eri määrän biokaasua ja biokaasun metaanipitoisuus vaihtelee. Biokaasutuottoja on tutkittu ja määritetty käytännössä useille eri raaka-aineille, ja niitä voidaan myös tarkastella teoreettisesti. Tätä käsitellään tarkemmin luvussa 2.2.

Lopuksi, luvuissa 2.3 – 2.6, raaka-aineita on tarkasteltu ryhmiteltynä niiden alkuperän perusteella: maatalouden sivutuotteet ja energiakasvit, yhdyskuntajätteet ja -lietteet sekä teollisuuden sivutuotteet ja jätteet.

Tietoja biokaasulaitoksista ja niiden kaasutuotoista Suomessa julkaistaan vuosittain Biokaasulaitosrekisteri-julkaisussa, joka on saatavilla Suomen Biokaasuyhdistyksen nettisivujen kautta ([www.biokaasuyhdistys.net](http://www.biokaasuyhdistys.net)). Suomessa yhdyskuntabiojätteitä ja lietteitä, mahdollisesti myös teollisuusjätteitä käsittelevät laitokset, ns. yhteiskäsittelylaitokset, ovat ohittaneet kapasiteetiltaan ja kaasutuotoltaan lietemädättämöt v. 2014. Maatalouden osuus on näihin nähden olematon. Määrällisesti eniten biokaasua tuotetaan Suomessa nykyisin vielä kaatopaikoilta keräämällä. Tämä määrä on kuitenkin vähenemässä biohajoavien jätteiden kaatopaikkasijoitusrajoitusten seurauksena.

## 2.1 Raaka-aineiden valinta ja hallinta

Biokaasulaitoksen raaka-aineet valikoituvat pääasiassa niiden sopivuuden ja saatavuuden perusteella. Sopivuuteen vaikuttavat useat eri tekijät, joiden arvioimiseen tarvitaan ymmärrystä anaerobihajoamisprosessin vaatimuksista. Saatavuus on paikallinen asia, ja merkittävä, jotta biokaasulaitos voi toimia kannattavasti, häiriöttä ja keskeytymättä ympäri vuoden. Lisäksi, raaka-ainevalintaan voi vaikuttaa myös prosessista saatavan mädätysjäännöksen laatuvaatimukset hyötykäytön kannalta, kuin myös erilaiset laitoksen taloudelliseen kannattavuuteen vaikuttavat tekijät (porttimaksut, eri jakeiden metaanintuottopotentiaalit). Seuraavassa paneudutaan raaka-ainevalintaan ja hallintaan lähinnä prosessivaatimusten näkökulmasta.

Monenlaiset raaka-aineet soveltuvat biokaasutuotantoon. Raaka-aineen soveltuvuutta voidaan arvioida mm. sen helposti hajoavan orgaanisen aineen määrän, metaanintuottopotentiaalın, kuiva-ainepitoisuuden, hiili/typpi-suhteen (C/N) ja/tai ravinne- ja hivenainekoostumuksen perusteella. Huomiota tulee kiinnittää myös syötteen mahdollisesti sisältäviin inhibiitoriä aiheuttaviin tai toksisiin aineisiin (ks. luku 4.2). Käytännössä eri raaka-aineita voidaan käyttää syöteseoksena, jolloin seoksella saavutetaan optimaaliset olosuhteet, mikä ei välttämättä olisi mahdollista tietyllä syötteellä yksinään. Tällaista käsittelyä nimitetään yhteiskäsittelyksi (co-digestion), ja vastaavasti näitä biokaasulaitoksia kutsutaan yhteiskäsittelylaitoksiksi.

Käytännössä raaka-aineen sopivuuden arviointi vaatii laboratorioanalysejä ja testejä. Yleisempiä syöteanalyysejä ovat pH, kuiva-aine (TS, total solids), orgaaninen kuiva-aine (VS, volatile solids), COD (kemiallinen hapenkulutus, chemical oxygen demand), kokonaistyppi (N) ja hiili (C) sekä metaanintuottotesti. Tarkemmissa arvioissa on suositeltavaa tehdä jatkuvatoimisia laboratoriotason koeajoja, joilla simuloidaan laitostason biokaasuprosessia.

Kuten edellä mainittiin, raaka-aineen sopivuutta voi rajoittaa myös biokaasuprosessista saatavan lopputuotteen, mädätysjäännöksen, hyötykäytön vaatimukset. Raaka-aineessa mahdollisesti olevat, biokaasuprosessissa hajoamattomat haitta-aineet, esim. raskasmetallit konsentroituvat mädätysjäännökseen (pitoisuus per kuiva-aine), kun osa muusta kuiva-aineesta muuntuu biokaasuksi. Näin ollen, etenkin jätepoijaisista raaka-aineista voi olla tarve selvittää mahdollisia haitta-aineita tarkemmin kuin mitä edellä mainitut yleiset syötenalyysit sisältävät.

Syötevalinnalla vaikutetaan oleellisesti prosessin toimivuuteen, biokaasu- eli energiatuottoon ja lopputuotteen laatuun.

### 2.1.1 Kuiva-aine (TS) ja orgaaninen aines (VS)

Materiaali, tässä raaka-aine, koostuu kuiva-aineesta ja vedestä. Kokonaismassasta käytetään yleensä termiä märkäpaino, jonka englanninkielinen lyhenne on ww (wet weight). Kuiva-aineesta käytetään lyhennettä TS (total solids) tai DM (dry matter), suomenkielessä käytetään usein myös lyhennettä ka (tai KA; kuiva-aine). Kuiva-aine koostuu orgaanisesta ja epäorgaanisesta aineksestä. Orgaanisesta aineksestä käytetään lyhennettä VS (volatile solids) tai oDM (organic dry matter). Epäorgaaninen aines on sama kuin tuhka. (Kuvio 1.1)

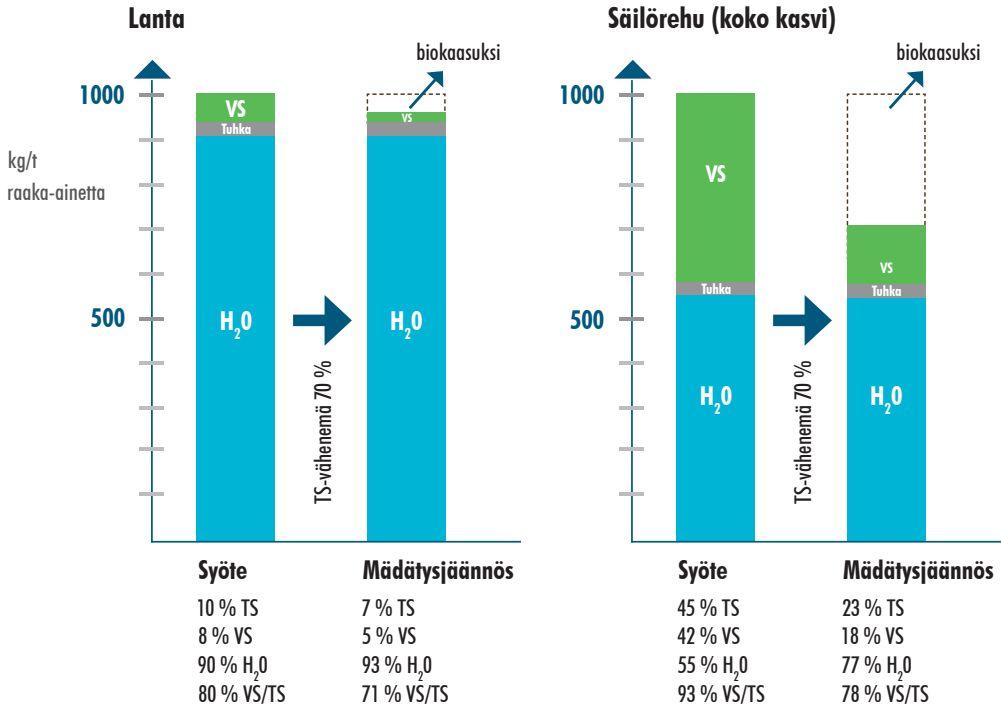


Kuvio 2.1 Näytteen TS-, VS- ja tuhkamääritelmät. Tässä esimerkissä TS-pitoisuus 20 %, VS 15 % (eli 75 % TS:stä) ja tuhka 5 % (eli 25 % TS:stä).

Biokaasutuottoprosessit toimivat tyypillisesti joko ns. märkä- tai kuiva-prosesseina (ks. luku 5). Märkäprosessissa reaktorisyötteen, syöteseoksen, kuiva-ainepitoisuus voi olla maksimissaan noin 15 %, ja on tyypillisesti välillä 5–12 %. Kuivaprosessissa maksimipitoisuus on vastaavasti noin 45 %, ja on tyypillisesti välillä 30–40 %. Tämä osoittaa, että biokaasutuottoprosessin biologinen mikrobitoiminta vaatii paljon kosteutta, vettä, vaikka prosessi olisikin ns. kuivaprosessi.

Biokaasu muodostuu kuiva-aineen hajotessa, ja nimenomaan sen orgaanisen osuuden hajotessa. Epäorgaaninen aines jää mädätysjäännökseen,

yhdessä hajoamattoman orgaanisen aineen ja veden kanssa. Biokaasutuotannon järkevyyteen vaikuttaa syötteen VS/TS-suhde – mitä suurempi suhde ja mitä helpommin hajoavaa VS-ainesta on, sitä sopivampi syöte on biokaasuprosessiin. Kuviossa 1.2. on esimerkit kahden TS- ja VS-pitoisuudeltaan erilaisen syötteen koostumus- ja massamuutoksista biokaasuprosessissa.



Kuvio 2.2 Raaka-aineen ja vastaavan mädätysjäännöksen koostumus- ja massavertailu. Kuvio muokattu lähteestä Fuchs ja Drosig, 2010.

Reaktorisyötteen kuiva-ainepitoisuuden hallinta, ja samalla myös VS-pitoisuuden hallinta, on tärkeää vakaalle hajoamisprosessille. Parhaimmillaan syötejakeet muodostavat seoksen, jonka kuiva-ainepitoisuus asettuu itsestään sopivalle tasolle eikä laimennusvettä tarvita. Seuraavassa on esitetty esimerkkilaskenta syöteseoksen TS- ja VS-pitoisuuksien laskennasta ja sopivan TS-pitoisuuden säätämisestä laimennusvedellä.



### ESIMERKKILASKENTA:

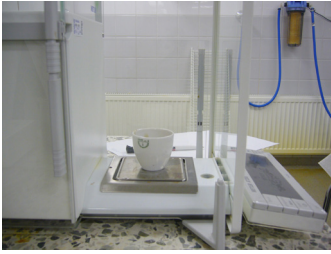
Syöteseos:

yhdyskuntabiojäte	20 tonnia (vrk) <sup>-1</sup> (TS 25 %, VS 20 %)
jätevesiliete	60 tonnia (vrk) <sup>-1</sup> (TS 10 %, VS 7 %)
kiinteä teollisuusjäte	20 tonnia (vrk) <sup>-1</sup> (TS 80 %, VS 78 %)

Tuorepainojen mukaan syöteseoksen (100 tonnia (vrk)<sup>-1</sup>) koostumus on siis 20 % biojätettä, 60 % lietettä ja 20 % teollisuusjätettä. Syöteseoksen (100 t (vrk)<sup>-1</sup>) kuiva-ainemäärä (TS) on yhteensä 27 tonnia (vrk)<sup>-1</sup>. TS:n mukaan seoksen koostumus on 19 % biojätettä, 22 % lietettä ja 59 % teollisuusjätettä. Vastaavasti VS:n mukaan: 17 %, 18 % ja 65 %. Biokaasua muodostuu vain syötteen VS-osasta, joten biokaasutuoton kannalta suurin merkitys tässä syöteseoksessa on teollisuusjätteellä, mikäli tämän sisältämä orgaaninen aines on helposti hajoavaa.

Syöteseoksen TS-pitoisuus on tässä esimerkissä 27 % (27 tonnia kuiva-ainetta (TS) 100 tonnissa syötettä). Märkäprosessille tämä on liian korkea kuiva-ainepitoisuus, eli syötettä tulee laimentaa joko vedellä tai vetisellä syötteellä. Jos tavoitteena on 15 %-n TS-pitoisuus syötteessä, niin tarvittava vesimäärä voidaan laskea seuraavasti: 27 tTS-määrä edustaa syötteessä 15 %-a, jolloin kokonaissyötemääräksi saadaan 180 t (vrk)<sup>-1</sup> eli (27 tTS/0,15 = 180 t). Tästä syötteet muodostavat 100 t (vrk)<sup>-1</sup>, eli vettä tarvitaan 80 t (vrk)<sup>-1</sup>.

TS- ja VS-pitoisuuden määrittämiseksi (Kuva 2.1) on käytössä standardimenetelmä SFS 3008: Veden, lietteen ja sedimentin kuiva-aineen ja hehkutusjäännöksen määrittäminen. Analyysissä vesi haihdutetaan lämpökaapissa (103-105 °C), jolloin veden lisäksi haihtuu myös muita helposti haihtuvia yhdisteitä, kuten haihtuvia rasvahappoja ja alkoholia. Mikäli näiden määrä on näytteessä merkittävä, analyysitulokset ei kerro todellista kuiva- ja orgaanisen aineen määrää. Kun syötettä käsitellään biokaasureaktorissa, nämä haihtuvat yhdisteet osallistuvat kuitenkin biokaasun tuotantoon. Näin ollen, jos syötteessä (esimerkiksi biojätteesä tai säilörehussa) on merkittävästi helposti haihtuvia yhdisteitä, standardimenetelmällä saadut tulokset on tarpeen korjata huomioiden haihtuvien aineiden määrä.



ANALYYSIVAAKA



EKSIKAATTORI



HEHKUTUSUUNI

Kuva 2.1 Näytteen TS- ja VS-pitoisuuden määrittämissä vaiheissa. 1. Näytteen punnitus upokkaaseen. 2. Upokkaan (+ näyte) haihdutus, jäädytys eksikaattorissa ja punnitus. 3. Upokkaan (+ haihdutettu näyte) hehkutus, jäädytys ja punnitus. Kuvat: Laura Kannisto

### 2.1.2 Ravinteet

Biokaasuprosessin ”työläiset” eli mikro-organismit tarvitsevat ravinteita energialähteenään ja rakennusaineeksi solukasvulle. Tällaisia ns. makroravinteita eli pääravinteita ovat hiili (C), typpi (N), fosfori (P) ja rikki (S). Lisäksi tarvitaan hivenaineita ja vitamiineja välttämättömän entsyymitoiminnan ylläpitämiseksi. Kaikki ravinteet prosessiin olisi hyvä tulla luonnostaan syötteen mukana, jotta vältetään erillisiltä lisäravinnelisyksiltä. Yhteiskäsittely on yksi hyvä tapa säätää syöteseos ravinnesuhteitaan sopivaksi hyvän ja tasapainoisen hajoamisen ja biokaasutuoton saavuttamiseksi.

Useissa julkaisuissa on esitetty sopivaksi C/N-suhteeksi biokaasutuotto-prosessissa suhdelukua välillä 10–30, ja optimaaliseksi suhteeksi arvoa välillä 15–25. Matala suhdearvo, eli korkea typen määrä suhteessa hiileen, voi johtaa prosessia inhiboivaan ammoniakkipitoisuuteen, sillä ammoniakki on typen (esim. proteiini- tai nukleoproteiini) päähajoamistuote. Korkea suhdearvo voi taas aiheuttaa typen puutetta mikrobitoiminnan kannalta. On kuitenkin hyvä huomata, että syötteen C/N-suhde ei kerro koko totuutta biokaasuprosessin toiminnasta, sillä syötteessä oleva hiili ja typpi voivat olla eri tavoin sitoutuneina yhdisteinä ja siten eri tavoin mikrobin hyödynnettävissä. Jos syötteessä oleva typpi on sidoksissa hankalasti hajoavaan orgaaniseen ainekseen ei alhainenkaan C/N-suhde välttämättä aiheuta inhiboivia ammoniakkipitoisuuksia. Vastaavasti korkean suhdeluvun syötteissä voi olla paljon hiiltä hajoamattomassa tai hitaasti hajoavassa muodossa, kuten ligniininä. Käytännössä toimivissa biokaasuprosesseissa on mitattu hyvin erilaisia suhdelukuja, tyyppillisesti suhdeluvut ovat olleet välillä 5–50 riippuen mm. prosessin syötteestä.

Taulukossa 2.1 on esitetty tyyppillinen solukoostumus. Solut sisältävät pääravinteiden lisäksi useita eri mikroravinteita, hivenaineita. Kaikkia näitä tarvitaan pienissä määrin solun rakennusaineiksi, ja toisaalta, useat

näistä liian suurina pitoisuuksina voivat inhiboida prosessia. Metanogeenille eli hajoamisprosessin viime vaiheen metaanituottajille ehdotoman välttämättöminä hivenaineina on mainittu: Ni, Co, Mo, Fe, Se ja Wo. Hydrolyysivaiheen mikrobeille välttämättöminä on mainittu Zn, Cu ja Mn. Näiden vaikutuksesta ja inhibitorisistä kerrotaan tarkemmin luvuissa 4.2.3 ja 4.2.4.

Taulukko 2.1 Tyypillinen solukoostumus (Schnürer ja Jarvis, 2009; modifioitu lähteestä Madigan and Martinko, 2006).

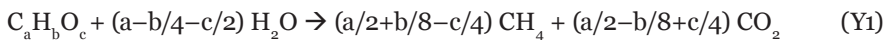
Alkuaine	C	O	N	H	P	S	K	Na	Ca	Mg	Fe	muut
% kuivapainosta	50	20	14	8	3	1	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5

Syötteiden sisältämä alkuainekoostumus (ravinteet ja hivenaineet) voidaan analysoida. Toisaalta, vaikka syöte sisältäisi kaikkia tarvittavia hivenaineita, analyysitulokset eivät kerro niiden biosaatavuudesta, eli mikrobien kyvystä käyttää hyväksi näitä hivenaineita. Näin ollen voi käytännössä osoittautua hyödylliseksi lisätä biokaasureaktoriin hivenaineita muodossa, jossa mikrobien tiedetään kykenevän niitä hyödyntämään. Näin varmistetaan prosessin optimaalinen toiminta ja hyvä biokaasutuotto.

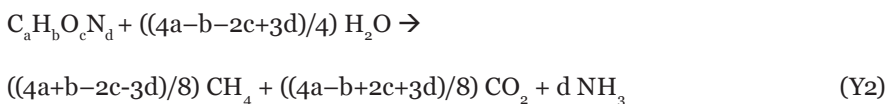
### 2.1.3 Metaanituoton määrittäminen

Syötteen metaanituottoa voidaan arvioida teoreettisesti ja kokeellisesti. Tässä käsitellään molempia tapoja. Teoreettisesti laskemalla voidaan päätyä ylioptimistisiin tuottoarvoihin, ja käytännössä tarkempaan arviointiin päästäänkin kokeellisen testin avulla.

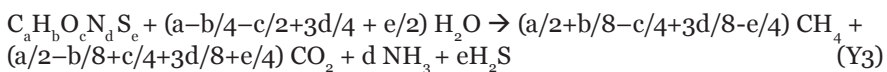
Teoreettinen tuottoarvio pohjautuu ns. Buswellin yhtälöön, jonka mukaisesti orgaanisen aineen ( $C_a H_b O_c$ ) metaanituotto voidaan laskea stokiometrisen yhtälön (Y1) mukaisesti:



Kun vielä huomioidaan syötteen tyyppi, stokiometriseen yhtälöön (Y2) tulee mukaan ammoniakki.



Vielä, kun huomioidaan rikki, saadaan yhtälö (Y3)

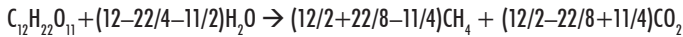


### ESIMERKKILASKENTA:

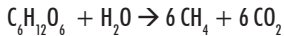
Lasketaan esimerkkinä tyypillisestä hiilihydraatista, esim. tavallisesta sokerista eli sakkaroosista saatava metaanituotto, ja metaanipitoisuus.

Sakkaroosi:  $C_{12}H_{22}O_{11}$ , eli  $a=12$ ,  $b=22$  ja  $C=11$

Saadaan stokiometrinen yhtälö:



eli lyhyemmin:



Yhtälön mukaisesti yksi mooli sakkaroosia tuottaa 6 moolia sekä metaania että hiilidioksidia. Muutetaan nämä massoiksi yhdisteiden molekyylipainojen avulla, jolloin saadaan

1 mol sakkaroosia  $\Rightarrow (12 \times 12 + 22 \times 1 + 11 \times 16) \text{ g (mol)}^{-1} \times 1 \text{ mol} = 342 \text{ g}$ ,  
ja vastaavasti 1 mol metaania  $\Rightarrow 16 \text{ g}$  ja 1 mol hiilidioksidia  $\Rightarrow 44 \text{ g}$

eli massoina lausuttuna

342 grammaa sakkaroosia tuottaa 96 grammaa ( $= 6 \times 16 \text{ g}$ ) metaania ja 264 grammaa ( $6 \times 44 \text{ g}$ ) hiilidioksidia.

Suhteutetaan tämä yhteen kiloon sakkaroosia eli 1 kgVS (kun VS edustaa tässä sakkaroosia), saadaan  $96 \text{ g} \times (1000/342) = 280,7 \text{ g}$  metaania ja  $771,9 \text{ g}$  hiilidioksidia.

Muutetaan kaasun massat tilavuudeksi niiden tiheysarvojen avulla (NTP, normaali lämpötilassa ja paineessa eli 1 atm ja 273 K eli 0 °C), jotka ovat

$CH_4$ :  $0,717 \text{ kg (m}^3)^{-1}$  ja  $CO_2$ :  $1,98 \text{ kg (m}^3)^{-1}$ , saadaan yhdestä sakkaroosikilosta  $0,391 \text{ m}^3$  metaania ja  $0,390 \text{ m}^3$  hiilidioksidia.

Näin ollen, metaanituotto on n.  $0,4 \text{ m}^3 (\text{kgVS})^{-1}$  eli n. 400 litraa  $(\text{kgVS})^{-1}$  (sakkaroosista), biokaasutuotto n.  $800 \text{ litraa } (\text{kgVS})^{-1}$  ja biokaasun metaanipitoisuus on n.  $50 \% (CH_4 / (CH_4 + CO_2) \times 100 \%)$ .

Vastaavasti kuin edellä on laskettu sakkaroosille metaanituotto ja biokaasun metaanipitoisuus voidaan nämä laskea rasvoille ja proteiineille. Käytännössä on hyvin erilaisia rasvoja (C-H-O -koostumukseltaan), samoin proteiineja (C-H-O-N-S -koostumukseltaan), joten tuotot näin ollen vaihtelevat. Taulukossa 2.2 on esitetty esimerkkinä tietyt rasva- ja proteiini-koostumukset, ja näistä saatavat tuotot Buswellin yhtälön mukaan laskettuna.

Taulukko 2.2 Orgaanisten yhdisteiden teoreettiset metaanituotot ja biokaasun metaanipitoisuus, laskettuna Buswellin yhtälön mukaisesti.

		litraa CH <sub>4</sub> (kgVS) <sup>-1</sup>	CH <sub>4</sub> %
<b>Hiilihydraatit</b>	(C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub> ) <sub>n</sub>	415	50
<b>Rasvat *)</b>	C <sub>16</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub>	1002	72
<b>Proteiinit**)</b>	C <sub>6</sub> H <sub>13,1</sub> O <sub>1</sub> N <sub>0,6</sub>	848	63

\*) esimerkkinä palmitiinihappo (C16-rasvahappo)

\*\*\*) proteiinien molekyylikaava ja täten metaanituotto vaihtelee, johtuen niiden erilaisesta aminohappokoostumuksesta

Edellä esitetty Buswellin yhtälön käyttö edellyttää tietoa syötteen sisältämän metaanituottoon osallistuvan helposti hajoavan orgaanisen aineen koostumuksesta, eli syötteen sisältämien eri orgaanisten yhdisteiden (hiilihydraatit, proteiinit, rasvat) koostumuksesta ja niiden suhteellisista osuuksista syötteessä. Toinen tapa arvioida metaanituottoa perustuu näytteen COD-pitoisuuteen (COD, kemiallinen hapenkulutus), jota käytetään tyypillisesti nestemäisten näytteiden orgaanisen aineen mittarina (VS-pitoisuuden sijasta). COD kuvaa koko orgaanisen aineen määrää, eli sekä helposti että vaikeammin hajoavaa orgaanista materiaalia. Näin laskettu metaanituotto onkin maksimituotto, jota on käytännössä haasteellista saavuttaa: kaiken orgaanisen aineen täytyy hajota ja tuottaa metaania 100 %:sti. Yksi gramma COD:ta vastaa metaanituottona 0,35 litraa (NTP, 1 atm, 273 K), perustuen alla esitettyyn laskentaan.

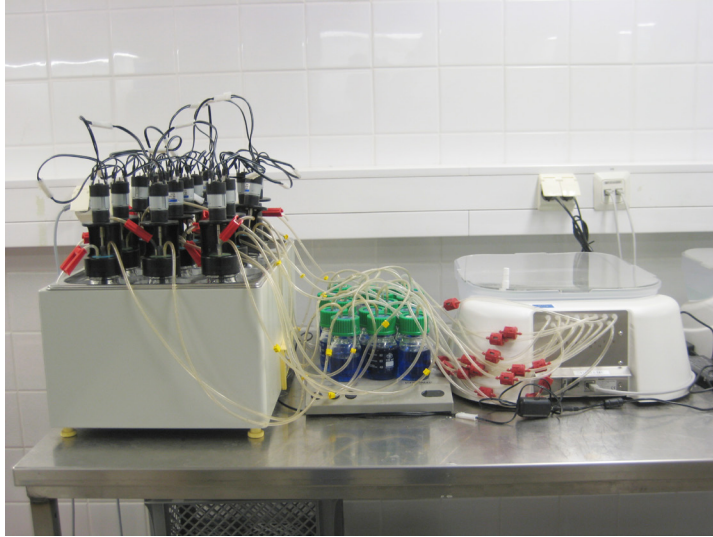


Yhtälöstä saadaan, että 1 mol CH<sub>4</sub> vastaa 2 mol O<sub>2</sub>, eli grammoina

16 g CH<sub>4</sub> (M<sub>w,CH4</sub> = 16 g (mol)<sup>-1</sup>) vastaa 64 g O<sub>2</sub> (M<sub>w,O2</sub> = 32 g (mol)<sup>-1</sup>),

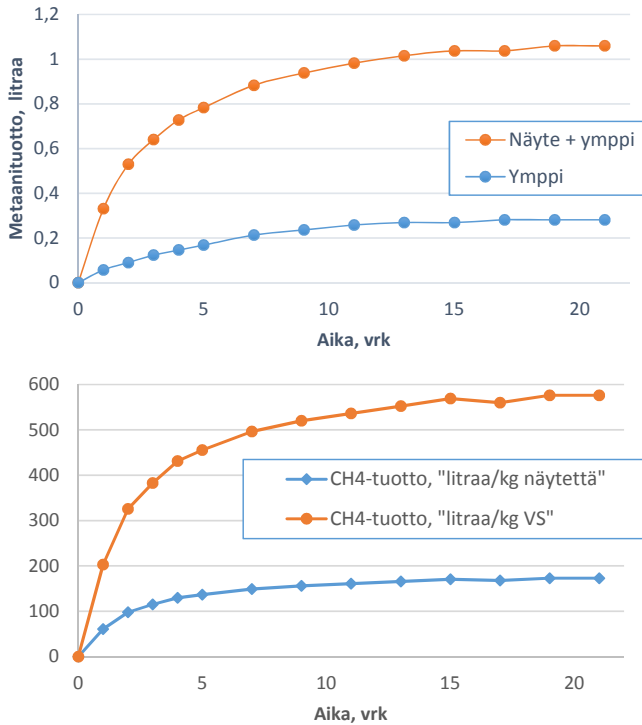
jolloin 1 g O<sub>2</sub> (= 1 g COD) vastaa 0,25 g CH<sub>4</sub> = 0,35 litraa CH<sub>4</sub> (ρ<sub>CH4</sub> = 0,72 g (litra)<sup>-1</sup>)

Kokeellisesti syötteen metaanituotto voidaan määrittää ns. metaanituottopotentiaalitestillä (BMP, Biochemical methane potential -testi). Tämä on standardoitu testimenetelmä (esim. VDI 4630, 2006), ja tähän tarkoitukseen tutkimuslaboratorioissa on tyypillisesti käytössä itse rakennettuja testisysteemejä. Markkinoilla on myös ainakin yksi kaupallinen testisysteemi, joita Suomessakin on käytössä useita; ruotsalaisen Bioprocess Control -yrityksen AMPTS-systeemi (Kuva 2.2; Automatic methane potential test system; [www.bioprocesscontrol.com](http://www.bioprocesscontrol.com)).



Kuva 2.2 Testilaitteisto metaanituoton määrittämiseen (AMPTS, Bioprocess Control).  
Kuva. Laura Kannisto.

Metaanituottotesti on panosluonteinen. Tutkittava näyte ja aktiivinen ympäristö, joka voi olla esim. toimivan biokaasureaktorin poistolietettä, pidetään tietty aika (esim. 21 vrk) hallituissa olosuhteissa (hapeton, vakio lämpötila) ja seurataan kaasutuottoa. Kaasu voidaan johtaa emäksisen liuoksen (esim. NaOH-liuos) läpi, jolloin hiilidioksidi peseytyy pois, ja näin testissä mitataan vain muodostuvan metaanin määrää. Kuviossa 2.3 on esitetty tyypillinen metaanintuottokuvaaja, eli kaasun määrä (ml) ajan funktiona (vrk). Vastaava tuottotesti tehdään myös pelkälle ympäristölle. Näyte-ympäristöpullon kaasutuotosta vähennetään ympäristöpullon kaasutuotto, niin saadaan selville pelkän näytteen kaasutuotto. Kun tiedetään testattavan näytteen määrä testipullossa, voidaan kaasutuotto (ml) suhteuttaa näytemäärään (g näytettä), ja tästä edelleen näytteen TS- ja VS-määrään. Kuvion 2.3 alla on esitetty esimerkkilaskenta testin antaman tuottotuloksen perusteella.



Kuvio 2.3 Panoskokeella mitattu metaanituotto ajan suhteen (testiaika 21 vrk). Mitatut metaanituotot testin lopulla: näyte+ymppi = 1060 ml ja ymppi = 280 ml, josta saadaan näytteelle testin aikaiseksi kokonaistuotoksi 780 ml metaania. Näytemäärä testissä oli 4,5 g, josta saadaan tuotoksi 173 ml g<sup>-1</sup>, eli litraa kg<sup>-1</sup>. Näytteen VS-pitoisuus oli 30 %, josta saadaan 578 litraa (kgVS)<sup>-1</sup>, joka on metaanituotto näytteen sisältämää orgaanista ainesta kohti.

## 2.2 Yleistä biokaasutuotoista

Kuten edellä on kuvattu, biokaasutuottoja mitataan ja arvioidaan tyypillisesti metaanituottoina, koska metaani edustaa biokaasun energiasisältöä. Tuottoarvoja raportoidaan käytännössä sekä biokaasun että metaanimääränä, joten onkin syytä olla huolellinen, kummasta milloinkin on kyse. Toinen huomiota vaativa seikka on, mihin suhteutettuna tuotto ilmaistaan. Tuotto voidaan tyypillisesti ilmaista raaka-aineen orgaanista ainesta (VS, oDM), kuiva-ainetta (TS, DM) tai tuorepainoa kohti. Taulukossa 2.3 on esitetty esimerkkinä kahdelle syötelle lasketut metaanituottoarvot, eri yksiköissä, eli litraaCH<sub>4</sub> (kgVS)<sup>-1</sup>, litraaCH<sub>4</sub> (kgTS)<sup>-1</sup> ja litraaCH<sub>4</sub> (kg)<sup>-1</sup>.

Taulukko 2.3 Biomassan kuiva-aineen (TS) ja orgaanisen aineen (VS) pitoisuudet, sekä metaanituotto eri yksiköissä. Käytännössä lannan ja keittiöbiojätteen metaanituotot vaihtelevat; tässä tuottoarvoja on käytetty esimerkkinä tuottolaskelmien havainnollistamiseksi.

	TS % (tuorepainosta)	VS % (tuorepainosta) % (kuiva-aineesta)	litraaCH <sub>4</sub> kg <sup>-1</sup> <sub>a)</sub>	litraaCH <sub>4</sub> (kgTS) <sup>-1</sup> <sub>b)</sub>	litraaCH <sub>4</sub> (kgVS) <sup>-1</sup> <sub>c)</sub>
Lanta	6	5 83	12,5	208	250
Keittiö- biojäte	25	20 80	80	320	400

a) Tunnetaan tuottoarvo 12,5 litraa kg<sup>-1</sup>, saadaan

$$12,5 \text{ litraa kg}^{-1} \div 0,06 \text{ kgTS kg}^{-1} = 208 \text{ litraa (kgTS)}^{-1},$$

$$12,5 \text{ litraa kg}^{-1} \div 0,05 \text{ kgVS kg}^{-1} = 250 \text{ litraa (kgVS)}^{-1}$$

tai

b) Tunnetaan tuottoarvo 208 litraa (kgTS)<sup>-1</sup>, saadaan

$$208 \text{ litraa (kgTS)}^{-1} \times 0,06 \text{ kgTS kg}^{-1} = 12,5 \text{ litraa kg}^{-1}$$

$$208 \text{ litraa (kgTS)}^{-1} \times (0,06 \text{ kgTS} \div 0,05 \text{ kgVS}) = 250 \text{ litraa (kgVS)}^{-1}$$

tai

c) Tunnetaan tuottoarvo 250 litraa (kgVS)<sup>-1</sup>, saadaan

$$250 \text{ litraa (kgVS)}^{-1} \times 0,05 \text{ kgVS kg}^{-1} = 12,5 \text{ litraa kg}^{-1}$$

$$250 \text{ litraa (kgVS)}^{-1} \times (0,05 \text{ kgVS} \div 0,06 \text{ kgTS}) = 208 \text{ litraa (kgTS)}^{-1}$$

Biokaasu- ja metaanituottomäärät (tilavuutena) on helppo muuttaa energiatuotoksi. Metaanin energiasisältö on 10 kWh (m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>)<sup>-1</sup> eli 36 MJ (m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>)<sup>-1</sup>. Hiilidioksidi on täydellisesti hapettunut yhdiste, eikä enää energiana suoraan hyödynnettävissä. Näin ollen, biokaasun energiasisältö määräytyy sen metaanipitoisuuden perusteella. Jos biokaasun metaanipitoisuus on esim. 60 %, tämän biokaasun energiasisältö on 6 kWh (m<sup>3</sup>biokaasua)<sup>-1</sup>. Biokaasun energiasisällön hyödyntämistä on käsitelty tarkemmin luvussa 7.

Seuraavassa on esitetty biokaasutuotantoon sopivia raaka-aineita ryhmiteltynä lähteittäin, eli maataloudesta, yhdyskunnasta ja teollisuudesta peräisin olevat tyypilliset raaka-aineet. Eri materiaalien yhteydessä esitetyt kaasutuottoarvot edustavat kokeellisesti mitattuja ja käytännössä saatuja tuottoja. On huomioitava, että koejärjestelyissä ja olosuhteissa voi olla eroja ja joskus samallekin raaka-aineella voi olla raportoitu hyvinkin erilaisia metaanituottoja. Mahdollisimman oikean ja käyttökelpoisen tuottoarvon saa selville, kun testissä käytetään käytännön prosessia vastaavia olosuhteita.

### 2.3 Maatalouden raaka-ainelähteet

Maataloudessa muodostuu merkittäviä massamääriä biokaasutuotantoon soveltuvia orgaanisia kasvin- ja kotieläintuotannon sivutuotteita, kuten



lantaa, hävikkirehuja ja kasvijätteitä. Lisäksi maataloudessa voidaan tuottaa erikseen ns. energiakasveja biokaasutuotantoon.

Ympäristöllisesti lanta ja kasvijätteet ovat kestävimpiä biokaasutuotannon raaka-aineita. Biokaasuprosessin avulla voidaan hallita niiden käsittelyn ja käytön aiheuttamia päästöjä sekä korvata fossiilista energiaa ja mineraalilannoitteita. Energiakasvien osalta on kuitenkin syytä tarkastella tuotannon kestävyyttä tapauskohtaisesti esimerkiksi elinkaaritarkastelun avulla. Energiakasvit on todettu elinkaaritarkasteluissa joissain tapauksissa kokonaisvaikutuksiltaan ympäristölle haitaksi. Tämä johtuu pääasiassa niiden aiheuttamasta maan käytön muutoksesta. Peltopinta-ala, joka käytetään energiakasvien tuotantoon, on korvattava jossain muualla ruuan- ja rehuntuotannon tarpeisiin. Tämä voi aiheuttaa paineita raivata uutta peltopinta-alaa, eikä raivaustarve välttämättä kohdistu samaan maahan, vaan esimerkiksi sademetsiin. Erityisen huono ympäristötase on yksivuotisilla energiakasveilla, kuten maissilla, joka vuosittain uudistettavana jättää peltomaan talveksi paljaaksi ja alttiiksi ravinne- ja kaasumaisiin päästöihin. Lisäksi, maissin tuotanto vaatii merkittäviä tuotantopanoksia mm. työkoneiden ja lannoitteiden käytössä (esim. Hamelin ym. 2013). EU:ssa onkin kiinnitetty erityistä huomioita mm. energiakasveihin liikennebiopolttoaineiden raaka-aineena. Biopolttoaineiden kestävyyskriteerit ja ILUC-direktiivi rajoittaa perinteisten, ruokaraaka-aineisiin perustuvien biopolttoaineiden määrää liikennebiopolttoainetavoitteisiin pyrittäessä. Toisaalta, Suomessa MMM on arvioinut, että 500 000 hehtaaria peltopinta-alaa voitaisiin käyttää kestävästi energian tuotantoon ruuan ja rehuntuotannon vaarantumatta. Tämä pinta-ala käsittää myös vajaahyödyntämättömät nurmet, kesannot ym.

### 2.3.1 Lanta

Lantaa hyödynnetään nykyään pääasiassa lannoitteena kasvintuotannossa sellaisenaan. Tällöin lannoitekäytön kannalta olennaisin lannan ominaisuus on sen ravinnepitoisuus. Toisaalta lannan kuiva-ainepitoisuus vaikuttaa myös lannan peltokäyttöön levityskaluston valinnan ja toimivuuden kautta.

Lantoja muodostuu erilaisia lantatyyppejä riippuen eläinlajeista ja eläinsuojan ratkaisusta. Myös tuotettu lantamäärä muuttuu eläinlajeittain ja lantatyypeittäin.

Lietelantaan (Kuva 2.3) sekoitetaan sonnan ja virtsan lisäksi eläinsuojan pesuvedet ja mahdollisia muita vesiä tarkoituksella, sillä lannanpoisto eläinsuojasta perustuu tällöin sen alhaiseen kuiva-ainepitoisuuteen (<12 %) sekä tätä kautta helppoon keruuseen ja siirtoon vähällä työpanoksella. Kuivikkeita käytetään vähän tai ei ollenkaan.



Kuva 2.3 Lietelantaa säiliössä. Kuvat: Sari Luostarinen

Kuivalannalla tarkoitetaan erikseen kerättyä, kuivaa sontaa, jonka joukossa on jonkin verran kuivikkeita, kuten turvetta, olkea tai kutteripurua. Tällöin virtsa kerätään erikseen ja siitä vain vähäinen osuus sitoutuu kuivikkeisiin. Kuivikelanta muodostuu, kun kuivikkeita käytetään selkeästi enemmän ja virtsa imeytetään kokonaan kuivikkeisiin. Kuivikepohjalantaa taas muodostuu, kun eläinsuojaan laitetaan paksu kuivikepatja, jota ei poisteta kuin jopa kerran vuoteen. Sen sijaan patjaa kasvatetaan lisäämällä kuiviketta entisen patjan päälle. Kuivien lantojen kuiva-ainepitoisuus vaihtelee välillä 15-70 % riippuen eläinlajista ja lantatyypistä. Lantojen orgaanisen aineen pitoisuus on yleensä noin 85 % kuiva-aineesta.

Muodostuvia lantamääriä voidaan arvioida eläinmäärän, eläinlajien ja eläinkohtaisten vuosittaisen lantamäärien avulla. Näin arvioiden Suomessa vuosittain muodostuvan lantamäärän on arvioitu olevan lähellä 17 miljoonaa tonnia. Suhteutus eri lantatyyppeihin voidaan tehdä tiloilla keskimäärin käytettävissä olevien lantatyyppeiden mukaisesti (Grönroos & Luostarinen, käsikirjoitus).

Eläinakohtaisesti muodostuvista lantamääristä on olemassa laskelmat (vuodelta 2014), joiden perusteella määräytyy vaatimukset lantaloiden vähimmäistilavuudelle. Vaatimukset ovat osana uutta nitraattiasetusta (Valtioneuvoston asetus eräiden maa- ja puutarhataloudesta peräisin olevien päästöjen rajoittamisesta, 1250/2014). Esimerkiksi lypsylehmällä (tuotostaso 8 500 kg) lietelantaa muodostuu 25,5 m<sup>3</sup>, erikseen kerättyjä kuivalantaa 15,8 ja virtsaa 8,7 m<sup>3</sup> sekä kuivike- ja kuivikepohjalantaa 28,6 m<sup>3</sup> eläintä kohti vuosittain. Varastointivaateissa on huomioitu kuivien lantojen palaminen ja tiivistyminen varastoinnin aikana (tilavuus -20 %). Mikäli kuivat lannat ajetaan suoraan eläinsuojasta tai vain lyhyen varastoinnin jälkeen biokaasulaitokseen, tätä vähennystä ei tule tehdä lantamäärää arvioitaessa. Biokaasulaitoksessa prosessoidun lannan osalta nitraattiasetuksen mukaisesti lantamäärän ei oleteta muuttavan biokaasuprosessin aikana ja mädätysjäännöksen varastointivaatimukset maatiloilla vastaavat lannan varastoinnin vaatimuksia.

Suomen lannoista teetetään lanta-analyysejä kaupallisissa laboratorioissa, sillä lannalla lannoittaminen perustuu pääasiassa tilakohtaisiin lanta-analyysin tuloksiin. Tuloksista on johdettu myös keskiarvotuloksia erilaisille lannoille ja myös näitä ”lannan taulukkoarvoja” voidaan käyttää lannoituksen perusteena (Taulukko 2.4). Lisää tietoa lanta-analyysien tuloksista löytyy mm. Viljavuuspalvelun internetsivuilta (<http://viljavuuspalvelu.fi>, ks. tilastot).

Taulukko 2.4 Lantojen keskimääräisiä ravinnepitoisuuksia lanta-analyysien pohjalta (Asetus 1250/2014)

LANTALAJI	Kok. P kg (m <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup>	Liuk. N kg (m <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup>	Kok. N kg (m <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup>
Naudan kuivikelanta	1,0	1,1	4,0
Naudan lietelanta	0,5	1,7	2,9
Naudan virtsa	0,1	1,5	2,5
Sian kuivikelanta	2,8	1,2	4,6
Sian lietelanta	0,8	2,2	3,4
Sian virtsa	0,2	1,3	2,0
Lampaan ja vuohen kuivikelanta	1,3	1,0	4,9
Hevosen kuivikelanta	0,5	0,4	2,6
Kanan kuivikelanta	5,6	4,2	9,4
Broilerin kuivikelanta	3,6	2,7	8,7
Kalkkunan kuivikelanta	4,4	3,2	8,0
Ketun kuivikelanta	12,7	1,4	6,5
Minkin kuivikelanta	12,1	0,9	5,2

Taulukossa 2.4 esitettyjä arvoja pidetään kuitenkin yleisesti liian alhaisina, mikä johtuu moninaisista virhemahdollisuuksista lanta-analytiikassa (ml. virheet näytteenotossa, näytteiden käsittelyssä, analytiikassa). Sen vuoksi Suomessakin ollaan luomassa uutta laskennallista normilantajärjestelmää, joka laskee lantojen keskimääräiset ominaisuudet (kuiva- ja orgaaninen aine, ravinteet) ja määrät (kg eläintä kohden vuodessa). Laskenta lähtee eläinten ruokinnasta ja erityksestä ja huomioi erilaisen eläinsuojien ratkaisut, lantoihin lisättävät materiaalit (vedet, kuivikkeet) sekä päästöt lannankäsittelyketjussa. Järjestelmää luodaan vuosina 2014–2016 Luonnonvarakeskuksen (LUKE, ent. MTT) ja Suomen ympäristökeskuksen (SYKE) yhteistyönä (Normilanta-hanke, <https://portal.mtt.fi/portal/page/portal/mtt/hankkeet/normilanta>).

Lantojen metaanituotot eivät ole kovin korkeita (Taulukko 2.5) johtuen yksinkertaisesti siitä, että eläin on rehustaan pääosan helposti hajoavasta orgaanisesta aineksesta jo hyödyntänyt ja erittää lantaan vain heikommin hajoavan aineksen. Toisaalta lantaa muodostuu suuria määriä tasaisesti ja suhteellisen tasalaatuisena biokaasuprosessin kannalta, mikä tekee siitä erinomaisen perusraaka-aineen biokaasulaitokselle. Lannoilla on myös usein korkea puskurointikyky, mikä edesauttaa biokaasuprosessin vakautta pitämällä sen pH:n tasaisena.

Taulukko 2.5 Lantojen metaanituottoja.

MATERIAALI	$\text{m}^3\text{CH}_4(\text{rVS})^{-1}$	$\text{m}^3\text{CH}_4(\text{t tp})^{-1}$	Lähde
Lehmän lietelanta	120–300	10–20	1–4
Sian lietelanta	180–490	12–24	1–4
Lehmän kuivalanta	126–250	24–55	1–4
Sian kuivalanta	162–270	33–39	1–4
Stiipikarjanlanta	150–300	42–156	2–5

VS = volatile solids, orgaaninen aine, tp = tuorepaino (eli märkäpaino)

1  $\text{m}^3\text{CH}_4$  = 1 litra kevyttä polttoöljyä = 10 kWh

1) Steineck ym. 1999; 2) KTBL 2010; 3) Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Forsten und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern 2004; 4) Institut für Energetik und Umwelt ym. 2006; 5) Edström 2011.

Eri eläinten lantojen metaanituottojen välillä on eroja. Eläimiä ruokitaan eri tavoin ja ne hyödyntävät rehunsa eri tavoin. Esimerkiksi nautojen ruuansulatus on hyvin tehokas, jolloin niiden lantaan jää suhteellisen vähän biokaasuprosessissa hajoavaa orgaanista ainesta. Sikojen lantaan taas päätyy enemmän orgaanista ainesta.

Lantatyypin vaikutus metaanituottoon. Lietelannassa on runsaasti vettä, sillä eläinsuojat pesuvedet johdetaan tarkoituksella sen joukkoon. Lietelanta on täten laimeaa ja sen metaanintuotto tuorepainoa kohti alhainen. Kuiva-, kuivike- ja kuivikepohjalannat ovat kiinteitä ja niillä on korkea kuiva-ainepitoisuus. Niiden metaanintuotto on täten tuorepainoa kohti korkeampi. Orgaanista ainesta kohti metaanintuotto ei välttämättä saman

eläimen lietelannan ja kiinteiden lantojen välillä kuitenkin merkittävästi vaihtelee. Tämä riippuu pääasiassa kiinteiden lantojen kuivikesisälöstä. Kuivikekin voi hajota biokaasuprosessissa ja lisätä lannan metaanituottoa (esim. olki). Toisaalta se voi olla hyvin heikosti hajoavaa (esim. turve) tai hajoamatonta (esim. kutterilastu, sahanpuru). Nämä kuivikkeet ovatkin biokaasuprosessin kannalta ”turhia”, sillä ne ainoastaan lisäävät laitoksen kapasiteetintarvetta antamatta vastaavaa hyötyä biokaasutuottona.

Lantatyypin vaikuttaa myös laitostekniikan valintaan, sillä lietalannoille soveltuvat märkäprosessit eivät sovellu kuiville lannoille yksistään. Niille on joko valittava kuivaprosessi tai sitten niitä on yhteiskäsiteltävä märkäprosesseissa lietelannan tai muun lietemäisen materiaalin kanssa. Eri prosessivaihtoehtoja käsitellään tämän kirjan luvussa 5.

### 2.3.2 Kasvibiomassat

Biokaasulaitoksiin soveltuvia kasvibiomassoja voidaan tuottaa tarkoituksellisesti tätä varten, nk. energiakasvit, tai ne voivat olla muun kasvintuotannon ohessa – sivutuotteina ja/tai jätteinä – muodostuvia. Energiakasveina on tutkittu mm. nurmirehun, rehumaisiin sekä erilaisten suuria satoja vähillä tuotantopanoksilla tuottavien kasvien, kuten tuoreena korjatun ruokohelven, käyttöä.

Suomessa potentiaalisin energiakasvi lienee kuitenkin nurmi (Kuva 2.4), jota tuotetaan jo rehukäyttöön merkittävällä hehtaarialalla (Seppälä ym. 2014). Nurmella on myös monia ympäristöhyötyjä, joita ei tällä hetkellä merkittävästi hyödynnetä, sillä tuotetulle nurmelle ei välttämättä ole käyttäjiä. Tuotannon erikoistumisen myötä nurmi on esimerkiksi jäänyt pois monien kasvinviljelytilojen viljelykierrosta, koska ei ole omia eikä lähelläkään kotieläintiloja, jotka tarvitsisivat nurmirehua. Tämä näkyy jatkuvasti viljanviljelyssä olevien peltojen maaperässä, joka köyhtyy ja jonka rakenne heikkenee. Tämä heikentää tuotantotasoa.



Kuva 2.4 Nurmi soveltuu biokaasutuotannon raaka-aineeksi. Kuva: Outi Pakarinen

Toisaalta monille tuotannon sivutuotteina muodostuville nurmille ei ole käyttötarkoituksia. Tällaisia ovat mm. nurmet kesannoilta, hoidetuilta viljelemättömiltä pelloilta ja suojavyöhykkeiltä. Ne voidaan korjata ja hyödyntää, mutta ilman käyttötarkoitusta nurmet jäävät usein hyödyntämättä. Massamääräisesti esimerkiksi kesannoilla nurmia muodostuu 3,5 milj. tonnia (tuorepaino; KHK-inventaarion tieto vuodelta 2013). Lisäksi rehuikäytössä muodostuu ylijäämiä ja hävikkiä, jota ei useinkaan hyödynnetä.

Suomen erilaiset nurmet voisivatkin olla merkittävä potentiaali biokaasutuotantoon ja osaltaan myös edistää ravinnekiertoja maataloudessa mm. edellä mainittujen etujen kautta.

Viljanviljelyssä muodostuu suuria määriä olkea (Kuva 2.5), joka hyödynnetään tällä hetkellä joko kuivikkeina tai pääosin kynnetään peltomaahan. On arvioitu, että olkea muodostuisi 4,8 milj. tonnia (tuorepaino) vuosittain (KHK-inventaarion tieto vuodelta 2013). Tämä luku kuitenkin sisältää sekä tyngän että olkisilpun, joten karkeana arviona ehkä 60 % on todellisuudessa pelloilta pois kerättävissä, ts. 2,9 milj. tonnia (kuiva-aineena 2,5 milj. tTS vuodessa). Jos tästä osakin ohjattaisiin biokaasutuotantoon, tuotettu energiamäärä voisi olla merkittävä. Oljen kuiva-ainepitoisuus on yleensä luokkaa 86–90 %, josta orgaanisen aineen osuus on 92 % (Lehtomäki 2006; kansallinen KHK-inventaario).



Kuva 2.5 Oljissa on suuri potentiaali biokaasutuotannon raaka-aineeksi. Kuva: Maritta Kymäläinen

Muualta kasvintuotannosta muodostuu myös jäte- ja sivutuotevirtoja, jotka soveltuvat biokaasutuotantoon. Materiaalien kuiva-ainepitoisuus vaihtelee ollen esim. jäteperunalla noin 22 % ja rypsijätteellä jopa 92 % (kansallinen KHK-inventaario).

Kasvibiomassojen hyödynnettävyys ja metaanintuotto biokaasulaitoksissa riippuu niiden ominaisuuksista. Olennaisia tietoja ovat biomassojen kuiva- ja orgaanisen aineen suhde, kuitujen ominaisuudet ja mahdollisesti myös typpipitoisuus. Yleisesti ottaen mitä korsiintuneempaa kasvimassa

on, sitä heikommin se hajoaa ja sitä vähemmän tuottaa biokaasua (esim. Lehtomäki 2006; Amon ym. 2007; Seppälä ym. 2009). Tämä johtuu siitä, että kasvin vanhentuessa sen ligniini-, selluloosa- ja hemiselluloosapitoisuudet kasvavat helpommin hajoavien orgaanisten yhdisteiden kustannuksella. Hajoavuutta voidaan mitata paitsi metaanituottopotentiaalia määrittämällä, myös rehukäyttöön tarkoitetuilla analyyssimenetelmillä. Tosin näiden välinen korrelaatio on vielä hieman epäselvää, eikä rehun hajoavuutta eläimen ruuansulatuksessa kenties voida suoraan käyttää hajoavuuden arviointiin biokaasuprosessissa kaikilla kasveilla. Esimerkiksi MTT:n tutkimuksissa heinänumrilla korrelaatio metaanipotentiaalin ja sulavuutta kuvaavan D-arvon välillä havaittiin, mutta apilanurmilla ei (Seppälä ym. 2013).

Kasvibiomassojen metaanituottoja on esitetty Taulukossa 2.6. Ne ovat yleisesti ottaen korkeat verrattuna eläinten lantaan (Taulukko 2.5), sillä ne sisältävät enemmän orgaanista ainetta. Näin ollen maatilojen biokaasulaitoksissa jo pieni määrä kasvibiomassaa lannan lisäsyötteenä lisää metaanituottoa merkittävästi. Esimerkiksi MTT Maaningan toimipisteen tilakohtaisessa laitoksessa noin 10 %:n nurmisäilörehulisä (syötteen tuorepainosta) lypsykarjan lietalannan käsittelyssä lähes tuplaa laitoksen metaanituoton (Luostarinen 2013a).

Taulukko 2.6 Kasvibiomassojen metaanituottoja.

Materiaali	m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> (tVS) <sup>-1</sup>	m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> (t tp) <sup>-1</sup>	Lähde
Olki	240–320	199–260	1
Nurmi	213–410	72–104	1–5
Ruokohelpi (tuore)	253–351	47–116	4
Maissi	312–410	-	5–6
Sokerijuurikkaan naatit	340	34	1

VS = volatile solids, orgaaninen aine, tp = tuorepaino (eli märkäpaino)

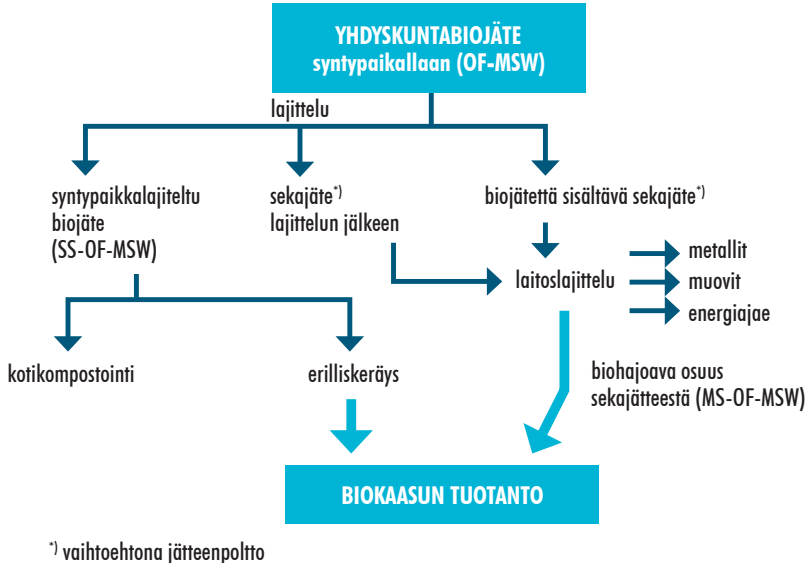
1 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> = 1 litra kevyttä polttoöljyä = 10 kWh

Lehtomäki 2006; 2) Kaparaju ym. 2002; 3) Lehtomäki ym. 2008; 4) Seppälä ym. 2009; 5) Weiland 2003; 6) Amon ym. 2007.

## 2.4 Yhdyskuntabiojäte

Yhdyskuntabiojäte on pääosin kotitalouksissa ja vastaavissa toiminnoissa (koulut ym.) sekä palvelutoiminnassa (kaupat ym.) syntyvää biohajoavaa jätettä. Biojätettä voidaan lajitella syntypaikkallaan (syntypaikkalajittelu) ja erilliskerätä hyötykäyttöön. Biohajoavaa osuutta voidaan myös erottaa laitospölyllä joko suoraan sekajätteestä (esim. Stormossen) tai biojätteen syntypaikkalajittelun jälkeisestä sekajätteestä (esim. Ekokemin ekojalostamo). Englanninkielisten nimitysten mukaisesti näistä yhdyskuntabiojätejakeista käytetään mm. seuraavia lyhenteitä: OF-MSW

(organic fraction of municipal solid waste), SS-OFMSW (SS, source sorted/separated) ja MS-OFMSW (MS, mechanically sorted). Biojätteen syntyä ja keräilyä biokaasutuotantoon on havainnollistettu Kuviossa 2.4.



Kuvio 2.4 Yhdyskuntabiojätteen lajittelu ja keräys biokaasutuotantoon.

Biojätteen erilliskeräys edellyttää syntypaikkalajittelua. Biojätteen lajitteluohjeet vaihtelevat alueittain, samoin kuin erilliskeräyksen laajuus. Näitä määrittää kyseisen biojätteen hyödyntämistapa eli käsittelyvaihtoehto: kompostointi, biokaasun tuotanto tai bioetanolin tuotanto. Biologiset käsittelylaitokset Suomessa, paikkakunnittain, löytyy listattuna Jätelaitos-yhdistyksen nettisivuilla ([http://www.jly.fi/laitokset\\_bio.php](http://www.jly.fi/laitokset_bio.php)). Biojätteen lajitteluohjeet löytyvät alueellisten jätehuolto-yhtiöiden tai kuntien omilta nettisivuilta.

Tyypillisesti yhdyskuntabiojäte (Kuva 2.6) koostuu ruoantähteistä ym. keittiöbiojätteestä, paperista, puutarhajätteestä ym. Näin ollen erilliskerätyn biojätteen laatu ja koostumus vaihtelee kausittain ja alueellisesti. Toisaalta, laatu myös vaihtelee, onko kyseessä kotitalouksista vai kauppoista, ravintoloista ym. kerätty biojäte. Lisäksi, merkittäviä eroja koostumuksessa on myös eri asumismuotojen välillä. Biojätteen koostumusvaihteluja on selvitetty mm. Helsingin seudulla tehdyssä lajittelututkimuksessa, jonka tulokset on julkaistu v. 2011 (HSY, 2011).

Edellä kuvatun perusteella on luonnollista, että yhdyskuntabiojätteen biokaasutuotto vaihtelee tapauskohtaisesti. Biojätteen kuiva-ainepitoisuuden (TS) on raportoitu vaihtelevan noin välillä 20–35 % ja tästä orgaanisen osuuden (VS/TS) noin välillä 70–90 %. Yhdyskuntabiojätteen metaani-



tuotot vaihtelevat tyypillisesti välillä 350 – 500 litraa (kgVS)<sup>-1</sup>, ja biokaasun metaanipitoisuus välillä 50 – 60 %. Biojätteessä käynnistyneen happokäymisen takia biojättesyötteen pH on tyypillisesti selvästi hapan, olen noin välillä pH 4 – 6. Biojätteen N-pitoisuuksien on todettu vaihtelevan välillä 1,5 – 10 % kuiva-aineesta, ja P-pitoisuudet ovat tähän verrattuna noin kymmenesosa, eli noin 0,2 – 1,0 % kuiva-aineesta. Biojätteen koostumuksen ja täten myös biokaasutuoton osalta on vielä korostettava edellä mainittua tapauskohtaista vaihtelua.

Joka tapauksessa yhdyskuntabiojäte sisältää aina eläinperäistä materiaalia, ja sen käsittelyä määrittääkin eläinperäisiä sivutuotteita koskeva ns. sivutuoteasetus (EY asetus 1069/2009 ja 142/2011) ja sen määräämä hygienisointikäsittely (70 °C, 1 h), tai vastaava hyväksytty käsittely. Lisäksi, ennen biokaasutuotantovaihetta biojättesyötettä on esikäsiteltävä, epäpuhtauksien erottamiseksi ja syötteen homogenisoimiseksi (ks. Luku 3.2).



Kuva 2.6 Biokaasulaitoskäsittelyyn menevä erilliskerätty biojätettä. Kuva: Urpo Jaakkola.

## 2.5 Puhdistamolietteet

Biojätteen lisäksi yhdyskunnasta peräisin olevia biokaasulaitokselle sopivia syötteitä ovat erilaiset jätevedenpuhdistuksen yhteydessä muodostuvat lietteet ja sako- ja umpikaivolietteet. Suomessa puhdistamolietteitä käsitellään yleisesti jätevedenpuhdistamojen yhteydessä olevissa biokaasureaktoreissa eli lietemädättämissä. Lietteitä käsitellään myös yhä lisääntyvässä määrin muissa biokaasulaitoksissa, ja yleisesti yhteiskäsitelynä yhdyskuntabiojätteen kanssa. Näissä tapauksissa tarvitaan lietteiden kuljetusta puhdistamolta biokaasulaitokselle.



Kuva 2.7 Biokaasureaktoriin syötettävää mekaanisesti kuivattua puhdistamolietettä.  
Kuva: Urpo Jaakkola.

Jäteveden puhdistuksen eri vaiheissa syntyy erilaisia lietteitä, jotka erotetaan vedestä tyypillisesti laskeuttamalla (laskeutus- eli sedimentaatio) tai erottamalla pinnalta (flotaatio) jäteveden selkeytysvaiheissa. Jäteveden esiselkeytyksessä, hiekanerotuksen jälkeen, erottuvaa kiintoainesta kutsutaan tyypillisesti primääri- eli raakalietteeksi. Lietteen kemiallinen saostus tuottaa fosforipitoista lietettä ja biologinen puhdistusvaihe (aerobinen aktiivilieteprosessi) tuottaa bakteeri- ym. mikrobisolupitoista biolietettä, josta osaa kierrätetään prosessissa ja osa poistetaan ylijäämälietteenä. Veden jälkiselkeytyksessä muodostuu vielä laskeutus- tai flotaatiolietettä. Tyypillisesti nämä em. lietejakeet yhdistetään ja syötetään sekalietteenä biokaasureaktoriin.

Kaikki edellä mainitut jäteveden selkeytysvaiheissa erotetut lietteet ovat erittäin vesipitoisia, kuiva-ainepitoisuudeltaan vain noin 1 %. Lietettä onkin tiivistettävä, sakeutettava eli kuiva-ainepitoisuutta nostettava ennen sen syöttöä biokaasureaktoriin. Laskeuttamalla (ns. gravitaatiosakeutus) sakeutusaltaassa voidaan kuiva-ainetta nostaa muutamalla prosentilla, mutta merkittävämpi vaikutus saadaan tehokkaammalla mekaanisella tiivistyksellä, esim. rumputiivistimellä tai lingolla. Näin päästään helposti järkeviin lietemädättämöjen syötelietesakeuksiin, TS n. 10 – 15 %. Lietteen mahdollista kuljetustarvetta varten, sen kuiva-ainepitoisuus nostetaan tyypillisesti vielä tätä korkeammaksi, noin 20 – 25 %:iin. Käytännössä Suomen lietemädättämöillä syötelietteen TS-pitoisuudet ovat alhaisia, mediaanin ollessa noin 4 %.

Orgaanisen aineen osuus lietteen kuiva-aineesta vaihtelee, pääasiassa johdun eri lietteiden vaihtelevista osuuksista syötelietteessä, kuten esiselkeytyslietteen ja biolietteen välisestä suhteesta. Syötelietteen orgaanisen

aineen osuus kuiva-aineesta vaihtelee tyypillisesti välillä 64 – 75%. Eri lietteiden suhteellisten osuuksien vaihtelu vaikuttaa myös biokaasutuottoon.

Biolietteen tuottoa voidaan parantaa esikäsittelyillä, joilla rikotaan biolietteessä olevan mikrobiston solurakennetta ja saadaan näin solun sisäinen orgaaninen aines paremmin hyödynnettyä. Suomessa näitä esikäsittelyjä on kovin vähän käytössä, mutta tutkimuksissa on saavutettu positiivisia vaikutuksia useilla erilaisilla menetelmillä: mekaanisilla, termisillä, kemiallisilla tai entsyymaattisilla esikäsittelyillä (Ks. luku 3.4). Puhdistamolietteiden metaanituotot vaihtelevat tyypillisesti välillä 160 – 400 litraa(kgVS)<sup>-1</sup>. Myös ravinnepitoisuuksissa on jonkin verran vaihtelua, mutta karkeasti puhdistamoliete sisältää tyyppä ja fosforia suhteessa 1:1. Typpipitoisuudet ovat tyypillisesti välillä 35 – 60 g(kgTS)<sup>-1</sup> ja fosfori 20 – 35 g(kgTS)<sup>-1</sup>.

Käsiteltävyyden ja metaanituoton kannalta puhdistamolietteet soveltuvat hyvin biokaasutuotantoon. Sen sijaan lopputuotteen, mädätysjäännöksen, laadun ja hyödynnettävyyden kannalta tilanne on haastavampi. Suomessa puhdistamolieteperäiset mädätysjäännökset täyttävät hyvin niille asetetut hygieenisuus- ja laatuvaatimukset, kuten raskasmetallipitoisuusrajat peltokäytön osalta. Tulevaisuudessa uusia vaatimuksia tullaan kuitenkin asettamaan mm. orgaanisille haitta-aineille. Näiden määrää suomalaisissa mädätysjäännöksissä ja vaikutuksia peltokäytössä tutkitaan Suomessa aktiivisesti.

Kuten edellä on todettu, mädätysjäännöksen käyttötarkoitus ja täten sen koostumus- ja laatuvaatimukset tulevat jatkossa yhä enemmän määrittelemään myös biokaasutuotantoon soveltuvat raaka-aineet. Hyvälaatuisista raaka-aineista saadaan arvokasta lannoitetta turvallisesti hyödynnettäväksi viljelykäytössä, ja täten ravinnekierrossa. Tähän tulee pyrkiä myös puhdistamolietteiden hyödyntämisessä.

## 2.6 Teollisuuden sivutuotteet ja jätteet

Biokaasutuotantoon hyvin soveltuvia orgaanisia sivutuotteita ja jätteitä syntyy etenkin elintarvike-, juoma-, rehu- ja panimoteollisuudesta ja teurastamotoiminnasta, mutta yleisesti kaikesta biomassoja jalostavasta toiminnasta. Tämä myös perustelee biokaasutuotannon roolia yhtenä keskeisenä osana tulevaisuuden biojalostamotoimintoja. Kuten edellä on esitetty puhdistamolietteiden osalta, niin vastaavasti teollisuuden jätevesien käsittelystä muodostuvat lietteet on hyödynnettävissä biokaasutuotantoon. Lisäksi, teollisuusjätevesissä voi olla orgaanisen aineen määrä ja pitoisuus (BOD-arvo) korkea, ja täten näillä jätevesilläkin voi olla merkittävää metaanituottopotentiaalia. Biokaasun tuotantoa jätevesistä kuvataan lyhyesti tämän kirjan luvussa 1.2.

Erilaisia biokaasutuotantoon soveltuvia teollisuusperäisiä orgaanisia materiaaleja on laaja kirjo. Vastaavasti niiden koostumus ja metaanituotot, kuin myös esikäsittelyvaatimukset vaihtelevat suuresti. Verrattuna yhdyskuntabiojätteeseen, teollisesta toiminnasta saadaan biokaasutuotannon kannalta yleensä homogeenisempaa, tasalaatuisempaa syötettä. Teollisuusjätteitä ja sivutuotteita käytetään yleisesti myös maatilatason biokaasureaktoreissa, tehostamaan lantaa käyttävien reaktoreiden biokaasutuottoja. Näitä syötteitä sopivasti seostamalla, joko keskenään tai maataloudesta sekä yhdyskunnasta saatavien syötteiden kanssa, voidaan parhaimmillaan säätää koko syöteseoksen koostumusta ja laatua optimaalisen hajoamisen ja hyvän biokaasutuoton saavuttamiseksi.

Taulukkoon 2.7 on koottu muutamien teollisuuden sivutuotteiden ja jätteiden metaanituottoja.

Taulukko 2.7 Esimerkkejä teollisuuden orgaanisten sivutuotteiden ja jätteiden metaanituotoista. Lähteet 1) Wellinger ym., 2013 ja 2) Bayr 2014

Materiaali	litraa kgVS <sup>-1</sup>	Lähde
Flotaatiliete (65–70% proteiinia + 30–35% rasvaa)	540	1)
Viljapohjainen rankki	470	1)
Oliivijäte ("pulp")	180	1)
Teurasjäte (sika)	430–630	2)
Teurasjäte (nauta)	570	2)
Teurasjäte (siipikarja)	260	2)
Sellu- ja paperiteollisuuden primääriete	210–230	2)
Sellu- ja paperiteollisuuden sekundääriete	50–100	2)

## LÄHTEET JA LISÄTIETOA

- Al-Seadi Teodorita (Ed.), 2008. Biogas handbook. University of Southern Denmark. Esbjerg, Denmark. 126 p. *Linkki e-julkaisuun.*
- Amon, T., Amon, B., Kryvoruchko, V., Zollitsch, W., Mayer, K. ja Gruber, L. 2007. Biogas production from maize and dairy cattle manure – Influence of biomass composition on the methane yield. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 118, 173-182.
- Bayr, S. 2014. Biogas production from meat and pulp and paper industry by-products. *Jyväskylä Studies in Biological and Environmental Science* 280. 88 s. *Linkki e-julkaisuun.*
- Deublein, D. ja Steinhauser, A. 2008. *Biogas from Waste and Renewable Resources.* Wiley-VCH Verlag GmbH. 443 p.
- Edström, M. 2011. Personal communication. JTI, Sweden.
- Fuchs, W. ja Drosig, B. 2010. *Technologiebewertung von Gärrestbehandlungs- und Verwertungskonzepten.* Universität für Bodenkultur Wien. 215 p.
- Grönroos, J. ja Luostarinen, S. 2015. Suomen lantojen käsittely. Käsikirjoitus.
- Hamelin, L., Naroznova, I. ja Wenzel, H. 2013. Environmental Consequences of Different carbon Alternatives for Increased Manure-Based Biogas. *Applied Energy* 114, 774–782.
- Helsingin seudun ympäristöpalvelut. Pääkaupunkiseudun biojätteen koostumus. Kotitalouksien ja palvelutoimialojen erilliskerätyn biojätteen lajittelututkimus. 2011. HSY:n julkaisuja 6/2011. Edita Prima Oy. 56 s. *Linkki e-julkaisuun.*
- Institut für Energetik und Umwelt gMmbH, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft & Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. 2006. *Handreichung – Biogasgewinnung und –nutzung.* 3., überarbeitete Auflage. Gülzow, Germany.
- Kaparaju P., Luostarinen S., Kalmari E., Kalmari J. ja Rintala J. 2002: Co-digestion of energy crops and industrial confectionery by-products with cow manure: batch scale and farm-scale evaluation. *Water Science and Technology* 45(10), 275-280.
- Kasurinen, V., Munne, P., Mehtonen, J., Türkmen, A., Seppälä, T., Mannio, J., Verta, M. ja Äystö, L. 2014. *Orgaaniset haitta-aineet puhdistamolietteisä.* Suomen ympäristökeskuksen raportteja 6/2014: 60 2. 67 s. *Linkki e-julkaisuun.*

- KTBL 2010. Gasausbeute in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Report. 2. überarbeitete Auflage.
- Kymäläinen, M., Kannisto, L. ja Salmela, M. 2014. Lietemädättämöjen tehostaminen lietesakeutta nostamalla. *Vesitalous* 6/2014, 26-30. *Linkki e-julkaisuun*.
- Lehtomäki, A. 2006. Biogas production from energy crops and crop residues. PhD thesis. University of Jyväskylä, Department of Biological and Environmental Science. Finland. 186 p. *Linkki e-julkaisuun*.
- Lehtomäki A., Viinikainen T. ja Rintala J. 2008: Screening boreal energy crops and crop residues for methane biofuel production. *Biomass and Bioenergy* 32, 541-550
- Luostarinen, S., Normak, A. ja Edström, M. 2011. Overview of biogas technology. 47 p. Baltic Forum for Innovative Technologies for Sustainable Manure Management. Knowledge Forum. *Linkki e-julkaisuun*.
- Luostarinen, S., Logrén, J., Grönroos, J., Lehtonen, H., Paavola, T., Rankinen, K., Rintala, J., Salo, T., Ylivainio, K. ja Järvenpää, M. (toim.). 2011. Lannan kestävä hyödyntäminen. MTT Raportti 21: 173 s. *Linkki e-julkaisuun*.
- Luostarinen, S., Paavola, T., Ervasti, S., Sipilä, I. ja Rintala, J. 2011. Lannan ja muun eloperäisen materiaalin käsittelyteknologiat. MTT Raportti 27: 64 s. *Linkki e-julkaisuun*.
- Luostarinen, S. (toim.) 2013a. Biokaasuteknologiaa maataloilla 1 : Biokaasulaitoksen hankinta, käyttöönotto ja operointi - käytännön kokemuksia MTT:n maatalakohtaiselta laitokselta / Sari Luostarinen (toim.). MTT Raportti 113. 98 s. *Linkki e-julkaisuun*.
- Madigan, M.T. ja Martinko, J.M. 2006. Brock Biology of Microorganisms (11th ed.). Pearson Education TLD. London
- Marttinen, S., Suominen, K., Lehto, M., Jalava, T. ja Tampio E. 2014. Haitallisten orgaanisten yhdisteiden ja lääkeaineiden esiintyminen biokaasulaitosten käsittelyjäänöksissä sekä niiden elintarvikeketjuun aiheuttaman vaaran arviointi. BIOSAFE-hankkeen loppuraportti. MTT Raportti 135: 70 s. *Linkki e-julkaisuun*.
- Mata-Alvarez, J., 2003. Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes. IWA Publishing.
- Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Forsten und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern. 2004. Düngung - Hinweise und Richtwerte für die landwirtschaftliche Praxis Leitfaden zur Umsetzung der Düngeverordnung.

- Schnürer, A. ja Jarvis, Å. 2009. Microbiological Handbook for Biogas Plants. Swedish Waste Management U2009:03. Swedish Gas Centre Report 207. 138 p. *Linkki e-julkaisuun.*
- Seppälä, M., Paavola, T., Lehtomäki, A. ja Rintala, J. 2009. Biogas production from boreal herbaceous grasses – specific methane yield and methane yield per hectare. *Bioresource Technology* 100, 2952-2958.
- Seppälä, A., Kässi, P., Ervasti, S., Kuoppala, K., Sormunen-Cristian, R., Särkijärvi, S., Heikkilä, T., Luostarinen, S. ja Rinne, M. 2013. Biochemical methane potential of timothy, tall fescue and red clover silages harvested at different stages of maturity. In: *The role of grasslands in a green future : threats and perspectives in less favoured areas. Proceedings of the 17th symposium of the European Grassland Federation, Akureyri, Iceland, 23-26 June 2013 / eds. Aslaug Helgadóttir and Alan Hopkins. Grassland Science in Europe* 18: p. 525-527.
- Seppälä, A., Kässi, P., Lehtonen, H., Aro-Heinilä, E., Niemeläinen, O., Lehtonen, E., Höhn, J., Salo, T., Keskitalo, M., Nysand, M., Winqvist, E., Luostarinen, S. ja Paavola, T. 2014. Nurmesta biokaasua liikennepolttoaineeksi. Bionurmi-hankkeen loppuraportti. MTT Raportti 151. 97 s. *Linkki e-julkaisuun.*
- Steineck, S., Gustafson, G., Andersson, A., Tersmeden, M. ja Bergström J. 1999. Plant nutrients and trace elements in livestock wastes in Sweden. *Naturvårdsverket, Rapport 5111, Sweden.*
- VDI 4630, 2006. Vergärung organischer Stoffe. Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche. Verein Deutscher Ingenieure.
- Weiland, P. 2003. Production and energetic use of biogas from energy crops and wastes in Germany. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 109, 263-274.
- Wellinger, A., Murphy, J. ja Baxter, D. (Eds.) 2013. *The biogas handbook. Science, production and applications.* IEA Bioenergy. Woodhead Publishing Ltd. Philadelphia. USA. 508 p.

## 3. Biokaasutuotannon raaka-aineiden esikäsittely

Sari Luostarinen (luku 3.1) ja Urpo Jaakkola (luvut 3.2–3.4)

Biokaasutuotannon raaka-aineiden esikäsittelytarve vaihtelee raaka-aineesta riippuen. Esikäsittely on helpoimmillaan vain esimerkiksi murskaus ja siirto prosessiin. Vaikeammassa tapauksissa esikäsittely koostuu useiden linjojen, säiliöiden ja osaprosessien yhdistelmästä. Tässä luvussa käydään läpi esikäsittelytekniikoita, ensin maatalouden näkökulmasta, sitten yhdyskuntabiojätteiden ja lietteiden osalta.

### 3.1 Maatalouden lantojen ja kasvibiomassojen käsittely

Lietelantaa ei yleensä tarvitse esikäsitellä ennen biokaasuprosessia. Tilojen omissa laitoksissa se kerätään usein esisäiliöön, josta se johdetaan varsinaiseen biokaasuprosessiin. Ennen pumppausta reaktoriin sitä sekoitetaan tasalaatuisuuden varmistamiseksi, sillä lietelannasta riippuen se on hyvin laskeutuvaa (sianliete) tai se kuorettuu (naudanlanta).

Kuivien lantojen ominaisuudet vaihtelevat erityisesti käytetyn kuivikkeen ja sen määrän vuoksi. Kuivike täytyy olla teknisesti käyttökelpoista, ts. soveltua laitoksessa käytettyihin laitteisiin. Esimerkiksi pitkäkortinen olki ei välttämättä liiku laimennettunakaan pumpuissa tai sellaisenaan kuiville materiaaleille tarkoitetuissa syöttölaitteissa. Se voi myös kietoutua mahdollisten sekoitinten lapoihin. Lisäksi se voi kellua, mikäli sekoitus ei pysty pitämään sitä reaktorin nestepinnan alla. Oljen silppuaminen ennen kuivikekäyttöä tai kuivalannan silppuaminen ennen biokaasuprosessiin johtamista onkin usein välttämätöntä. Se edesauttaa myös massojen hajoamista prosessissa ja toimii eräänlaisena esikäsitteilynä. Silppuamisen voi hoitaa esimerkiksi apevaunulla, mutta mikäli silputaan lantaa, samaa apevaunua ei tietenkään voi käyttää rehujen silppuamiseen.

Kasvibiomassojen (kuten myös kuivien lantojen) hajoamista voidaan lisätä esikäsitteilyillä, joista yleisimpiä ovat erilaiset fysikaaliset silppuamiset tai murskaamiset (Kuva 3.1). Tavoite on yleensä pienentää partikkelikokoa, jolloin mikrobit pääsevät tehokkaammin hajottamaan syötettä. Toisaalta samalla pyritään varmistamaan laitoksen tekninen toimivuus ml. kasvimaan toivottu liikkuminen ja pysyminen reaktorin nestemassan sisällä sekä sekoittimiin tms. kietoutumisen estäminen. Hygienisointia ei lannoille ja kasvibiomassoille yleensä vaadita.





Kuva 3.1 Peltobiomassan hienonnus ja kuljetus ruuvitekniikalla. Kuvat: Sari Luostarinen (vasen) ja Maritta Kymäläinen (oikea).

Tarjolla olevista tilojen käyttöön soveltuvista mekaanisista esikäsittelyistä kerrotaan enemmän esim. raportissa Luostarinen 2013b (englanniksi). Yksinkertaisinta on silputa kasvibiomassa esimerkiksi apevaunulla riittävän pieneksi silpuksi ennen syöttöä (Kuva 3.2). Apevaunu voi olla kiinteänä osana laitosta tai myös rehukäytössä. Tehokkaampaan murskaamiseen on saatavilla erilaisia myllyjä ja murskaimia. Tällöin saavutettava partikkelikoko on vielä selkeästi silppuamista pienempi ja jotkin alhaisemman kuiva-ainepitoisuuden kasvibiomassat voivat muuntua miltei pumpattavaksi soseeksi.



Kuva 3.2 Apevaunu ja säilörehua apevaunun hinnalla menossa biokaasureaktoriin. Kuvat: Sari Luostarinen

Kirjallisuudessa esitetään myös monenlaisia muita esikäsittelymenetelmiä, kuten entsymaattinen tai pH:n muutokseen perustuva hydrolyysi, ultraääni ja lahottajasienten käyttö. Niiden käytännön toimivuus on kuitenkin ristiriitaisten tietojen varassa. Toisissa tutkimuksissa esitetään merkittäviä hajoavuuden ja täten metaanituoton nousuja ja toisissa taas metaanituoton laskua.

Esikäsittelyä valittaessa onkin harkittava, mikä on tarkoituksenmukaista. Esimerkiksi runsaasti energiaa kuluttava esikäsittely voi kääntää laitoksen energiataseen jopa miinukselle, mikäli sen hajoavuutta ja täten

metaanituottoa lisäävä vaikutus ei kompensoi esikäsittelyn itsensä kuluttamaa energiaa. Toisaalta arvokkaiden kemikaalien käyttö voi osoittautua kalliimmaksi kuin sen antamat tuotot metaanintuoton lisääntyessä. Erityisesti kasvibiomassojen käytössä olennaisempaa nykyisin onkin silpuaminen riittävän pieneksi partikkeliksi ja toisaalta asianmukainen säilöntä, jonka aikana kasvit eivät pääse hajoamaan.

On kuitenkin täysin mahdollista, että tulevaisuudessa jotkin näistä esikäsittelyistä osoittautuvat teknistaloudellisesti kannattaviksi. Silloin niiden avulla voidaan päästä myös kustannussäästöihin, sillä hajoavuuden nopeutuminen mahdollistaa pienemmän reaktoritilavuuden käsiteltävää massaa kohden. Esikäsittelymenetelmiä on esitelty tarkemmin mm. kirjassa Wellinger, Murphy ja Baxter (2013).

Lanta ja helposti pilaantuvat kasvijätteet tulisi johtaa biokaasuprosessiin mahdollisimman pian niiden muodostuttua. Lannalla tämä on olennaista, jottei lannasta menetetä kaasumaisina päästöinä orgaanista ainetta eikä typpeä. Tilakohtaisessa laitoksessa lanta johdetaan yleensä mahdollisimman tuoreeltaan biokaasureaktoriin. Myös tilojen yhteisissä laitoksissa ja suurissa laitoksissa lantaa kuljetetaan laitokseen mahdollisimman tiheällä aikavälillä. Väliaikainen varastointi onnistuu yleensä tilan omista olemassa olevissa lantaloissa. Osa kasvijätteistä puolestaan muodostuu sesongeittain ja pilaantuu helposti. Tällaisia ovat esimerkiksi perunan- ja muun vihannestuotannon jätteet. Ne täytyykin saada kuljetettua biokaasulaitokseen heti muodostuttuaan ja laitoksen täytyy olla varautunut tähän ajoittain käytettävissä olevaan syötteeseen.



Kuva 3.3 Peltobiomassaa voidaan varastoida aumoissa, siiloissa ja paaleissa biokaasukäyttöä varten. Kuvissa suojavyöhykenurmea muovilla ja pahnalla katetussa aumassa ja säilörehua pyöröpaaleissa. Kuvat: Juha Luostarinen (Metener Oy) ja Maritta Kymäläinen.

Säilöittäviä kasvibiomassoja ovat erityisesti olki ja rehuksavit, kuten nurmi. Olki säilyy riittävän kuivana, joten sille soveltuvat kuivikekäytön säilöntämenetelmät. Nurmilla puolestaan säilörehumenetelmät (Kuva 3.3.) soveltuvat rehuikäytön ohella myös biokaasukäyttöön, sillä tavoite on

molemmissa sama: estää nurmen hajoaminen ja pilaantuminen säilönän aikana. Tämä osaltaan tekee nurmista Suomessa houkuttelevan lisäsyötteen lantalaitoksiin. Tiloilla on jo osaaminen ja kalusto sen säilöntään säännöllistä biokaasusyöttöä varten.

### 3.2 Biojätteen esikäsittely

Erilliskerätty biojäte sisältää erilaisia epäpuhtauksia, kuten muovia, styroksia, metallia kuten aterimia, puuta, avaamattomia pakkauksia, kiviä, hiekkaa ym. Epäpuhtaudet pitää poistaa mahdollisimman hyvin ennen biojätteen syöttöä biokaasureaktoriin. Esikäsittelylinjastoja on tarjolla monella kaupallisella valmistajalla. Käytännössä biokaasulaitoksilla on tyypillisesti yksittäisiä laitteita eri laitetoimittajilta, mistä on räätälöity oma esikäsittelylinjasto.

Biojätteen esikäsittely lähtee liikkeelle vastaanotto paikasta, joka on yleensä joko suppilo, allas tai loosi. Vastaanotto paikka on yleensä hajuhaittojen ehkäisemiseksi sisätiloissa tai vähintään katettu, erillisellä ilmastoinnilla varustettu tila. Koska biojäte on märkää, välillä erittäinkin vellimäistä, veden ja biolietteen hallinta vastaanotossa on tärkeää. Myös haittaeläimien torjunta on varmistettava, samoin kuin biojätteen kuljetusautojen pesu ja itse vastaanoton puhtaanapito.



Kuva 3.4 Biojätteen syöttö työkoneella esimurskaimeen. Kuva: Envor Biotech Oy.

Vastaanoton jälkeen biojäte siirtyy joko hihnalla, ruuvilla tai työkoneella esimurskaimeen (Kuva 3.4). Esimurskaimen tai repijän tehtävä on avata biojättemuovipussit ja pakkaukset sekä hienontaa isot kappaleet. Markkinoilla on ns. kompakteja biojätteen käsittelylaitteita, jotka murskaavat,

avaavat pakkaukset, käsittelevät pakkausmateriaalin eli rejektin ja liettävät biojätteen haluttuun muotoon. Nämä laitteet ovat käteviä pienille laitoksille tai tietynlaisille jätevirroille. Isoissa laitoksissa nämä vaiheet toteutetaan kuitenkin erillisinä osaprosesseina, mistä muodostuu esikäsitelylinjasto, jolla saavutetaan suurempi kapasiteetti.

Esimurskaimen jälkeen linjastossa on tyypillisesti magneetti poistamassa metalleja. Linjastojen magneetit ovat yleensä tyypiltään kestopagneetteja. Esimurskauksen jälkeen biojätteestä voidaan joko seuloa kevyt rejekti pois tähti-, tuuli- tai rumpuseulalla tai ruuvipuristimella puristaa biojäte ja rejekti erikseen. Rejekti käsitellään muovipesurissa, jonka jälkeen se kelpaa energiajätteeksi. Joissakin jätelaaduissa rejektin käsittelyä ei tarvita, ja se voidaan toimittaa sellaisenaan esimerkiksi polttoon.

Käsittely biojäte sisältää vielä pieniä epäpuhtauksia, jotka ovat päässeen seulasta tai puristimesta läpi. Linjastoissa kannattaa käyttää toista magneettia ja jopa epämagneettisten metallien paljastinta estämään esim. isojen rosterikappaleiden pääsy eteenpäin.

Riippuen, onko biokaasulaitos märkä- vai kuivatyyppinen, linjastot eroavat tässä kohtaa yleensä toisistaan. Kuivatyyppisissä laitoksissa massa on reaktoriin sopivaa edellä mainitun esikäsitelyn jälkeen ja voidaan siirtää syötteenvalmistukseen. Jotkut laitostoimittajat lupaavat, että pelkkä esimurskaus riittää kuivaprosessiin. Märkätyyppisissä biokaasulaitoksissa biojäte lietetään pumpattavaan muotoon. Tyypillisesti biojätteen kuiva-ainepitoisuus on välillä 20 – 35 %, ja jotta bioliete olisi pumpattavaa tulee kuiva-ainepitoisuus säätää 10 – 15 %:iin riippuen reaktorityypistä. Tämä voidaan tehdä eri tavoin:

- ✓ Jälkimurskaimella, johon lisätään nestejake joukkoon. Jälkimurskaimen käyttö kiihdyttää hydrolyysiä itse bioreaktorissa, koska biojäte on hienommassa muodossa. Jälkimurskausta voidaan kutsua myös homogenisoinniksi.
- ✓ Pumpusekoittimella, joka sekoittaa biojätteen ja nestejakeen keskenään sopivaksi syötteenksi.
- ✓ Pulpperilla, joka on nopeasti pyörivä mekaaninen sekoitin, pulperissa on yleensä terävät terät, jotka myös murskaavat biojätettä.
- ✓ Sekoitussäiliössä, jossa pysty- tai vaakasekoittimilla lietetään biojäte nestejakeeseen.

Sivutuoteasetus määrittää biojätteen luokkaan 3. Tämä tarkoittaa, että biojäte tulee ennen loppukäyttöä hygienisoida ja sen palakoko ei saa ylittää 12 mm. Sivutuoteasetuksesta on kerrottu tarkemmin luvussa 9. Sivutuoteasetuksen vaatimusten takia ja myös paremman prosessin toiminnan

takaamiseksi, biojätettä käsittelevissä laitoksissa käytetään märkäseulontaa erottamaan kooltaan yli 12 mm partikkelit.

Biojätteen joukossa on vuodenajasta riippuen mukana hiekkaa. Bioreaktorin häiriöttömän toiminnan kannalta on biojätteen esikäsittelyn loppupäähän hyvä rakentaa hiekanerotussäiliö, jossa raskas helposti pohjalle painuva tuote saadaan eroon. Tähän samaan säiliöön voidaan yhdistää myös pintakaavin, joka poistaa pinnalle nousevat epäpuhtaudet.

Esikäsittelyn jälkeisessä varastosäiliössä tulee olla jatkuva sekoitus, jotta massa pysyy homogeenisenä. Massaa ei kannata olla esikäsittelyssä valmiina suuria määriä, koska säiliössä käynnistyy happokäyminen ja kaasuntuotto. Joillakin biokaasulaitoksilla tätä hyödynnetään ja kaasut kerätään jo varastosäiliöstä talteen.

### 3.3 Lietteiden esikäsittely

Lietteiden käsittely on helpompaa eikä vaadi niin suuria investointeja verrattuna kiinteiden raaka-aineiden esikäsittelyyn. Lietteellä toimivia biokaasulaitoksia on Suomessa huomattavasti enemmän kuin kiinteitä raaka-aineita hyödyntäviä laitoksia. Hyviä esimerkkejä lietebiokaasulaitoksista ovat jätevedenpuhdistamoiden biokaasulaitokset eli lietemädättämöt.

#### 3.3.1 Puhdistamolietteet

Puhdistamolietteet eivät sisällä isoja kiinteitä kappaleita. Lietteet tulevat biokaasukäsittelyyn tyypillisesti linkouksen, ruuvipuristuksen tai suotonauhapuristuksen jälkeen. Puhdistamolietteet siirretään käsittelylaitokselle yleensä siirtokuormalavoilla. Puhdistamolietteen joukkoon voi päätyä epäpuhtauksia, jos lavalle on jäänyt sinne kuulumatonta materiaalia. Joillakin jätevedenpuhdistamoilla puhdistamolietettä ei siirretä suoraan käsittelystä siirtolavalle, vaan se johdetaan erilliseen loossiin. Kun puhdistamoliete kuormataan siirtolavalle, mukaan päätyy helposti kiviä.

Suurin puhdistamolietteiden ongelma on hiekka. Yleensä jätevedenpuhdistamoiden hiekanerotus toimii riittävän hyvin biokaasukäsittelyä ajatellen. Kuitenkin varsinkin vanhempien puhdistamoiden hiekanerotuksessa voi olla ongelmia ja hiekka päätyy puhdistamolietteen joukkoon. Hiekka aiheuttaa biokaasuprosessissa pumppujen nopeampaa kulumista, kerrostumia säiliöihin ja pahimmassa tapauksessa reaktorin pohjan tukkeutumisen.

Puhdistamolietteen kiintoainepitoisuus riippuu puhdistamolla käytössä olevasta sakeutus- ja kuivausprosessista. Kuljetuskustannusten

alentamiseksi, puhdistamoiden etu on poistaa vettä lietteestä mahdollisimman paljon. Kuivatun, kuljetettavan lietteen kuiva-ainepitoisuus vaihtelee tyypillisesti välillä 15 – 30 %.

Vastaavasti kuin biojätteenkin osalta, myös lietteet halutaan saada märkätyyppisellä biokaasulaitoksella pumpattavaan muotoon, eli kiintoainepitoisuus välille 8 – 15 %. Tätä kutsutaan liettämiseksi. Liettämisessä neste ja puhdistamoliete sekoitetaan keskenään. Yleisimmin käytetään ns. pannotekniikoita, joissa lietetään altaassa yksi kuorma kerrallaan. Liettämiseen voidaan käyttää esimerkiksi:

- ✓ Maataloudesta tuttua apevaunua
- ✓ Säiliön pohjalla olevia liettämiseen tarkoitettuja ruuveja
- ✓ Pysty- tai poikittaissekoittimia
- ✓ Liettäviä ruuvipumppuja
- ✓ Kierrättäviä lietepumppuja.

Prosessin kannalta parasta olisi, jos liettäminen ei olisi herkkä epäpuhtauksille. Liettäminen jälkeen massasta voidaan erottaa epäpuhtaudet ja hiekka. Massa on kuitenkin liettäminen jälkeenkin suhteellisen paksumaa, mikä tekee hiekanerotuksesta haastavaa. Suunnittelussa on siis osattava huomioida mahdollinen hiekan kertyminen ja poisto prosessista. Liettäminen jälkeen on hyvä varmistua, ettei pumppuihin pääse esimerkiksi kiviä. Tämän välttämiseksi biokaasulaitoksilla on käytössä esimerkiksi välipiä tai putkistoihin asennettavia repijöitä.

Jos lietettyä lietettä ei pumpata heti biokaasureaktoriin, sitä voidaan säilöä jatkuvasekoitteisessa säiliössä. Sekoituksella varmistetaan, ettei paksumaa liete vajoa pohjalle. Puhdistamolietteen joukossa on vähemmän helposti hajoavaa orgaanista ainesta kuin biojätteessä, joten liete ei aloita happokäymistä niin helposti. Yhteismädätyslaitoksilla myös puhdistamolietteet hygienisoidaan, sen sijaan useimpien lietemädättämöjen mädätysjäännöksen hygieeninen laatu varmistetaan kompostoinnilla. Kuvassa 3.5 on erilaisia hygienisointiyksiköitä.



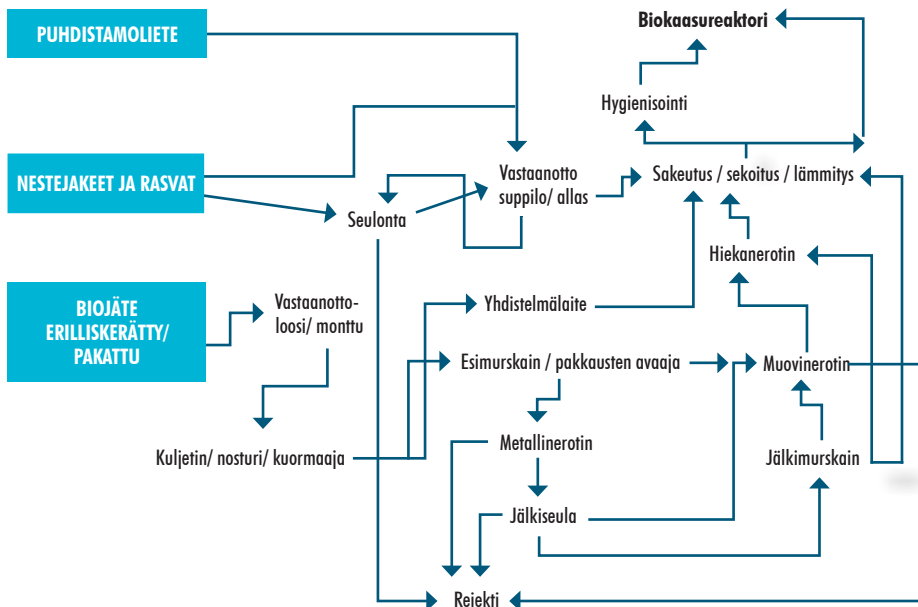
Kuva 3.5 Vehmaan biokaasulaitoksen hygienisointiyksiköt (vasemalla) ja Turun biokaasulaitoksen termoinen hydrolyysiprosessi (oikealla). Kuvat: Biovakka Suomi Oy.

### 3.3.2 Rasva- ja teollisuuslietteet

Rasvalietteitä voidaan kerätä imuautolla ravintoloiden ja teollisuuden rasvakaivoista. Lietteitä voi syntyä myös elintarviketeollisuuden muista prosesseista. Rasvalietteiden vastaanotossa on valmistauduttava siihen, että lietteen joukossa on kovettunutta rasvaa, kumihanskoja ja muita epäpuhtauksia. Rasvalietteet tuodaan usein säiliöautolla ja ne puretaan joko ulkopuolisella pumpulla, auton omalla pumpulla puhaltamalla tai avaamalla autosta tyhjennysventtiili tai takalaita. Yleisesti rasvalietteiden esikäsittelyyn riittää seulonta.

Rasvalietteiden kiintoainepitoisuus ei yleensä ole kovin korkea, mutta orgaanisen aineen määrä on suuri. Rasvalietteen varastosäiliössä on hyvä olla jatkuvatoiminen sekoitus, sillä rasva jakautuu helposti säiliön pintaan ja muodostaa kiinteän ”korpun”. Säiliössä on hyvä olla myös lämmitys, jotta rasva ei pääse kovettumaan. Pelkkiä rasvalietteitä käyttäviä biokaasulaitoksia ei Suomessa ole, vaan yleensä rasvalietteet sekoitetaan esikäsittelyn jälkeen joko biojätteen tai puhdistamolietteen joukkoon.

Kuviossa 3.1 on esitetty yksi esimerkki edellä mainittujen syötejakeiden esikäsittelyprosessoinnista.



Kuvio 3.1 Biojätteiden, puhdistamo- ja rasvalietteiden esikäsittely biokaasuprosessointia varten.

### 3.4 Esikäsittelyjä kaasutuoton tehostamiseksi

Markkinoilla on erilaisilla markkinanimillä olevia laitteita, jotka lupaavat bioreaktorin kaasuntuotannon parantamista. Yleensä tavoitteena on nopeuttaa bioreaktorissa tapahtuvaa hydrolyysiä eli orgaanisen massan ensihajoamista. Menetelmien toiminta ja teho riippuvat aina käytettävästä raaka-aineesta. Valmistajien lupaamiin kaasuntuotannon kasvuihin kannattaa suhtautua varauksella. Laitteistoinvestointi on yleensä aina iso taloudellinen panostus, ja suositeltavaa onkin testata menetelmällä saavutettavat edut esim. laboratoriomittakaavan metaanituottotestauksella ennen investointipäätöstä. Myös biokaasun käyttötarkoitus ja siitä saatava tuotto on huomioitava huolella. Lisäksi on huomioitava menetelmän käyttökulut, sillä osa kuluttaa paljon energiaa tai kemikaaleja.

Yleisesti, esikäsittelyt voidaan jakaa fysikaalisiin, kemiallisiin ja biologisiin menetelmiin. Myös erilaisia yhdistelmiä esikäsittelyistä on tutkittu ja käytössä. Seuraavassa on esitetty jo käytössä olevia yleisiä käsittelytapoja. Tiedossa olevia uusia menetelmiä ovat mm. otsonointi, ja korkeapainekäsittelyt, mutta näitä menetelmiä on vielä kehitettävä ennen teollisen mittaluokan käyttöä.

#### 3.4.1 Fysikaaliset menetelmät

Mekaaniset esikäsittelyt ovat yleisimpiä fysikaalisia menetelmiä, joihin kuuluvat ns. homogenisaattorit tai hienomurskaimet. Yksinkertaistettuna mekaanisilla murskaimilla koitetaan rikkoa massa mahdollisimman pieneksi, jolloin massan pinta-ala kasvaa, mikä puolestaan helpottaa hydrolyysivaihetta. Murskauksen yhteydessä voidaan massan joukkoon lisätä nestettä, jolla saadaan säädettyä kuiva-ainepitoisuus sopivaksi. Mekaanisten menetelmien ongelmina on terien kuluminen ja suuri sähkönkulutus.

Termiset menetelmät voidaan myös luokitella fysikaalisiin esikäsittelyihin. Biokaasulaitoksilla hygienisointiyksikkö voidaan sijoittaa prosessiin joko ennen tai jälkeen bioreaktorin. Hygienisointiyksikkö ennen bioreaktoria toimii esikäsittelyn osana rikkomalla massan rakennetta.

Metsäteollisuudessa paljon käytetty höyryräjäytys on eräs termisen esikäsittelyn muoto. Höyryräjäytyksessä käsiteltävä massa johdetaan tankkiin, jossa höyryn avulla paine nostetaan korkeaksi, minkä jälkeen paine nopeasti lasketaan, mikä rikkoo massan rakenteen. Hieman samaa tekniikkaa on myös terminen hydrolyysi, jossa solun rakenne rikotaan korkeassa lämpötilassa (120 – 200 °C) (Kuva 3.5). Termisissä menetelmissä biokaasun tuotannon tehostumiseen vaikuttaa käsiteltävä raaka-aine, käsittelylämpötila ja käsittelyn kesto. On huomattava, että hajoamisessa voi muo-



dostua myös inhiboivia yhdisteitä, jolloin esikäsittelyn kesto ja lämpötila tulee räätälöidä tapauskohtaisesti (Wellinger ym. 2013)

Fysikaaliseksi menetelmäksi voidaan laskea myös massan hajottaminen ultraäänellä, sähkökineettisesti (Wellinger ym. 2013) tai UV-valolla. Näillä menetelmillä massassa olevien solujen solukalvo rikotaan ja solun sisäinen vesi vapautuu ja tämä nopeuttaa hydrolyysiä.

### 3.4.2 Kemialliset menetelmät

Kemialliset menetelmät perustuvat useimmiten joko happojen tai emästen käyttöön. Emäksiä, kuten kalkkia, natriumhydroksidia tai kaliumhydroksidia on tutkittu ja käytetty erityisesti lignoselluloosan (kasvi-biomassan) esikäsittelyssä, koska emäkset parantavat selluloosan ja hemiselluloosan hydrolyysiä ja liukoistavat myös ligniiniä (Wellinger ym. 2013). Biojätteiden ja rasvojen käsittelyssä ei kemiallisia käsittelyjä ole Suomessa käytössä. Puhdistamolietteille on olemassa kemiallisia käsittelyjä, mutta niiden tarkoitus ei ole biokaasutuoton parantaminen, vaan lietteen kunnostus ja stabilointi. Näitä menetelmiä on mm. Kemiran kemicond, kalkkistabilointi ja peretikkahappokäsittelyt. Nämä ovat ns. lietteenkunnostusmenetelmiä. Yleensä lietteenkunnostuksen jälkeen liete kompostoidaan eikä sitä käytetä enää biokaasuprosessissa.

Biokaasulaitoksella, jossa reaktorin raaka-ainepohja on ravinteiltaan niukka voidaan esikäsittelyssä lisätä massan joukkoon lisäravinteita. Nämä lisäykset optimoidaan yleensä biokaasureaktorin ravinnetasapainon mukaan. Biokaasuprosessin tarvitsemista ravinteista kerrotaan tarkemmin luvuissa 2 ja 4.

### 3.4.3 Biologiset menetelmät

Biokaasuprosessi voidaan toteuttaa kahdessa (tai useammassa) vaiheessa, jolloin ensimmäinen vaihe optimoidaan hydrolyysille ja asidogeneesille (pH yleensä välillä 4–6) ja toinen vaihe asetogeneesille ja metanogeneesille (neutraali pH). Tällöin ensimmäisestä vaiheesta voidaan puhua myös biologisena esikäsittelynä. Erityisesti selluloosaa, hemiselluloosaa ja tärkkelystä hydrolysoivat entsyymit ovat aktiivisimmillaan alhaisemmassa pH:ssa. Ensimmäisessä vaiheessa voidaan käyttää myös korkeampaa lämpötilaa, vaikka varsinainen metaanituottovaihe (toinen vaihe) toimisi mesofiilisenä. Myös erilaisia entsyymaattisia käsittelyjä on tutkittu erityisesti lignoselluloosalla (Wellinger ym. 2013). Näissäkin käsittelyissä on huomioitava käsittelyn investointi- ja käyttökustannukset suhteessa saavutettavaan käsittelykapasiteetin ja/tai kaasuntuotannon lisäykseen.

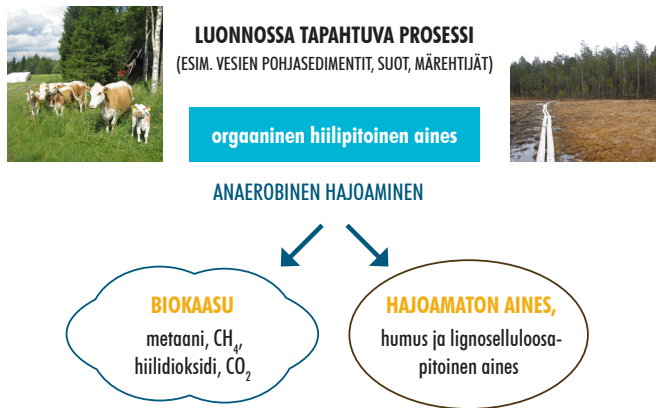
## LÄHTEET JA LISÄTIETOA

- Latvala, M. 2009. Biokaasun tuotanto suomalaisessa toimintaympäristössä (BAT). Suomen Ympäristö 24. 114 s. *Linkki e-julkaisuun*.
- Luostarinen, S. (ed.) 2013b. National scenarios, best practices and recommendations for manure energy use in the Baltic Sea Region. 136 p. Baltic Forum for Innovative Technologies for Sustainable Manure Management. Knowledge Forum. *Linkki e-julkaisuun*.
- Pöyry Environment Oy, 2007. Lietteenkäsittelyn nykytilta Suomessa ja käsittelymenetelmien kilpailukyky selvitys, Sitra. 52 s. *Linkki e-julkaisuun*.
- Taavitsainen, T. 2006. Malla2-hankkeen loppuraportti. 123 s. *Linkki e-julkaisuun*.
- Wellinger, A., Murphy, J. ja Baxter, D. (eds.) 2013. The biogas handbook. Science, production and applications. IEA Bioenergy. Woodhead Publishing Ltd. Philadelphia. USA. 508 p.

## 4. Anaerobinen hajoaminen ja sen hallinta biokaasureaktorissa

Maritta Kymäläinen

Biokaasureaktorissa tapahtuu syötteiden biologinen anaerobinen hajoaminen (anaerobic digestion, AD), jonka tuloksena syntyy biokaasua ja jäljelle jää hajoamaton aines, jota nimitetään mädätysjäännökseksi. Vastavaa hajoamista tapahtuu mm. soilla ja kaatopaikoilla hapettomissa olosuhteissa, missä on orgaanista ainesta ja mikrobiologista aktiivisuutta. Vastaavia reaktioita tapahtuu myös lehmän pötsissä. (Kuvio 4.1)



Kuvio 4.1 Luonnon hapettomissa olosuhteissa, kuten soilla ja vesien pohjasedimenteissa sekä lehmän pötsissä tapahtuu luonnostaan anaerobista hajoamista.

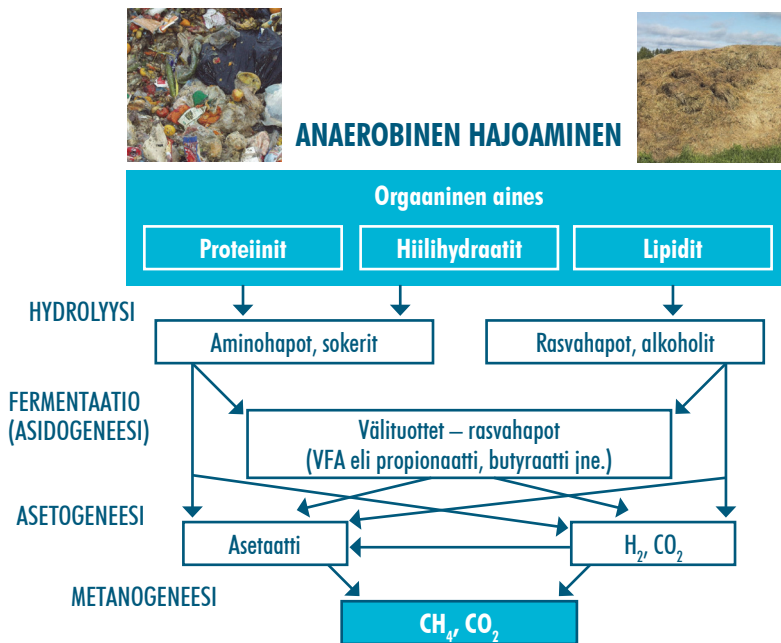
Anaerobisen hajoamisprosessin ymmärtäminen mahdollistaa prosessihallinnan käytännössä. Yhä parempi ymmärtäminen avaa myös mahdollisuuksia laajentaa biokaasutuotantosovelluksia uusille syötteille ja kehittää uusia prosessiratkaisuja. Avainasemassa tässä on prosessin mikrobiologian ja toimintaolosuhdevaatimusten tunteminen. Prosessimittauksen ja analyysien avulla pystytään seuraamaan prosessin tilaa, ja optimoimaan hajoamista. Optimoinnin avulla saavutetaan paras mahdollinen hajoamisprosessin vakaus ja reaktorin biokaasutuotto.

Tässä pääluvussa käsitellään anaerobisen hajoamisprosessin vaiheita ja toimintaedellytyksiä sekä miten näitä käytännössä hallitaan biokaasureaktorissa.

## 4.1 Anaerobisen hajoamisprosessin päävaiheet

Biokaasun tuotanto perustuu orgaanisen aineen anaerobiseen hajoamiseen. Tähän osallistuu useita erilaisia mikro-organismeja, jotka työskentelevät yhdessä, ja ovat osin toisistaan riippuvaisia: edellisen vaiheen hajoamistuotteet ovat seuraavan vaiheen syötteitä. Tämän yhteistyön häiriintyminen johtaa prosessihäiriöihin ja biokaasutuoton heikkenemiseen. Hyvin toimivassa biokaasureaktorissa hajoamisprosessi etenee tasapainossa: kun edelliset hajoamisvaiheet tuottavat välituotteita, niin seuraavat käyttävät niitä edelleen eikä hajoamisen välituotteet pääse kertymään ja aiheuttamaan inhibitioita. Suuri määrä erilaisia mikro-organismeja työskentelemässä yhdessä tarkoittaa myös, että olosuhteet (ulkoiset ja ravitsemukselliset) täytyy olla kaikille toimivat. Käytännössä mikrobisto valikoituu olosuhteiden mukaisesti, mukaan lukien syötteen koostumus, mikä tarkoittaa, että merkittävät olosuhde- ja syötevaihtelut häiritsevät prosessia.

Kuviossa 4.2 on havainnollistettu anaerobisen hajoamisprosessin vaihteellaisuutta: neljä päävaihetta ja siten myös neljä pääryhmää erilaisia mikro-organismeja. Seuraavissa luvuissa käsitellään tarkemmin kukin hajoamisvaihe.



Kuvio 4.2 Anaerobisessa hajoamisessa tapahtuva orgaanisen aineen vaiheittainen hajoaminen biokaasuksi.

#### 4.1.1 Hydrolyysi

Hajoamisen ensimmäisessä vaiheessa, hydrolyysissä, suuret orgaaniset molekyylit, kuten proteiinit, hiilihydraatit ja rasvat, pilkkoutuvat osaksiin ja liukoistuvat. Nämä syötteen sisältämät orgaaniset molekyylit ovat liian isoja, jotta mikrobisolut voisivat ottaa niitä sisään ravinnokseen. Näin ollen solut tuottavat ja välittävät solun ulkopuolelle entsyymejä hoitamaan hajotustyön. Esimerkiksi hiilihydraatteja, kuten tärkkelystä, hajottavat amylaasi-entsyymit tuottaen sokereita, proteiineja hajottavat erilaiset proteaasit tuottaen aminohappoja, ja rasvoja hajottavat lipaasit tuottaen rasvahappoja ja glyserolia. Näitä entsyymejä tuottavia mikrobeja, bakteereita kutsutaan hydrolyyttisiksi bakteereiksi. Tyypillistä on, että monet hydrolyyttisiä entsyymejä tuottavat bakteerit osallistuvat myös seuraavan hajoamisvaiheeseen eli asidogeneesiin. Tällaisia ovat esim. *Clostridium*-, *Ruminococcus*- ja *Bacteroides*-suvun bakteerit. Yleisesti tunnetaan hyvin monia hydrolyysiin osallistuvia eri bakteerilajeja.

Biokaasulaitoksen syötteen sisältävät tyypillisesti monenlaisia hiilihydraatteja. Hiilihydraatit voivat olla yksinkertaisia sokereita, joita ei tarvitse pilkkoa tai monia tuhansia sokerimolekyylejä sisältäviä polysakkarideja, kuten tärkkelystä, selluloosaa ja hemiselluloosaa. Näitä polysakkarideja on paljon kasvimateriaaleissa, kuten hedelmissä, vihanneksissa ja viljoissa. Lisäksi, esim. hedelmissä on yleisesti pektiiniä, joka on myös polysakkaridi. Eläinten varastopolysakkaridi on puolestaan glykogeeni. Polysakkaridit pilkkoutuvat hydrolyysivaiheessa tuottaen koostumuksensa mukaisia sokereita. Esimerkiksi, tärkkelyksestä ja selluloosasta saadaan glukoosia, hemiselluloosasta saadaan joukko erilaisia sokeita – glukoosia, ksyloosia, mannoosia ja arabinoosia.

Hiilihydraattien lisäksi syötteen sisältävät yleisesti myös proteiineja. Eriyisesti eläinperäisissä syönteissä voi olla korkeitakin proteiinipitoisuuksia. Proteiinin pilkkoutuessa muodostuu ensin lyhyempiketjuisia peptidejä ja lopulta aminohappoja. Aminohapoissa on nimensä mukaisesti jokin tai joitain aminoryhmiä, mikä tarkoittaa myös korkeita typpipitoisuuksia.

Syönteissä on tyypillisesti erilaisia rasvoja, eläin- ja kasvirasvoja, hyvin vaihtelevia määriä riippuen syönteestä. Suuria rasvapitoisuuksia voi olla esim. teurastamojätteissä ja etenkin rasvanerotuskaivojen lietteessä. Rasvojen pilkkoutuessa muodostuu erilaisia rasvahappoja ja alkoholia (glyseroli).

### 4.1.2 Fermentaatio, asidogeneesi

Hajoamisen toista vaihetta kutsutaan asidogeneesiksi, sillä sen tuloksena syntyy erilaisia happoja (acids). Fermentoivat mikrobit käyttävät sokereita, aminohappoja, alkoholeja ym. erilaisiksi orgaanisiksi hapoiksi (etikka-, propioni-, voi-, maitohappo jne. – yhteisellä nimellä haihtuvat rasvahapot eli VFA, volatile fatty acids) ja alkoholeiksi, ja samalla muodostuu ammoniakkia (aminohapoista), hiilidioksidia ja vetyä. Tätä työtä on tekevässä suuri joukko erilaisia mikrobeja, osin samoja kuin edellä hydrolyysivaiheessa, ja lisäksi monia muita. Asidogeneesi-vaiheen tuotekoostumus vaihtelee syötteistä ja olosuhteista sekä vallitsevasta mikrobipopulaatiosta riippuen. Jopa samasta asidogeneesivaiheen syötteestä, esim. glukoosista, saadaan eri määriä erilaisia lopputuotteita (esim. etikkahappo, voi-happo, alkoholit,  $\text{CO}_2$  ja  $\text{H}_2$ ) riippuen olosuhteista ja fermentoivasta bakteerista.

Käytännössä em. orgaaniset hapot esiintyvät biokaasuprosessissa pääosin negatiivisesti varautuneina ioneina (=anioni), esim. etikkahappo ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) asetaattina ( $\text{CH}_3\text{COO}^-$ ). Varautunut muoto muodostaa liuoksessa helposti suoloja metallien kanssa, esim. natriumasetaattia.

### 4.1.3 Anaerobinen hapettuminen, asetogeneesi

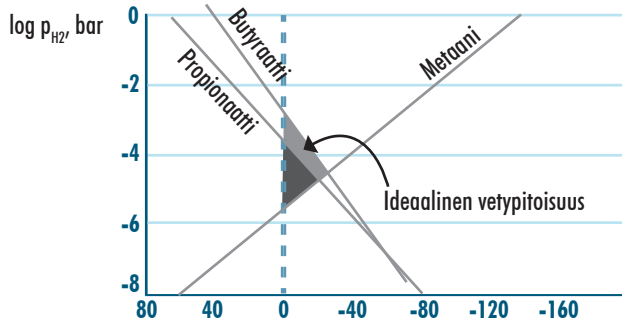
Asetogeneesi-vaiheessa tuotetaan edellisen vaiheen tuotteista, kuten haihtuvista rasvahapoista (VFA), metaanin tuotannon raaka-aineita: asetaattia, vetyä ja hiilidioksidia. Vaikka vaiheen nimi on hapettuminen, tähän ei käytetä molekylaarista happea ( $\text{O}_2$ ), vaan kyse on anaerobisesta hapettumisesta, jolloin reaktioihin osallistuu hapettuneita yhdisteitä, kuten nitraattia, sulfaattia ja karbonaattia. Asetogeenit käyttävät näitä yhdisteitä elektronien vastaanottajina, jolloin nämä pelkistyvät.

Tyypillistä tälle vaiheelle on, että asetogeeniset bakteerit toimivat symbioosissa vetyä kuluttavien metanogeenien kanssa. Tätä kutsutaan syntrofiseksi yhteydeksi asetogeenien ja metanogeenien välillä: vetyä muodostuu ja sitä kuluu tasapainoisesti. Korkea vetytiteisyys estää asetogeenien toimintaa, joten metanogeenien tulee muuntaa vetyä tehokkaasti edelleen metaaniksi. Kuviossa 4.3 on selitetty tätä yhteyttä tarkemmin, perustuen reaktioiden termodynaamisiin ehtoihin.

### 4.1.4 Metaanin muodostuminen, metanogeneesi

Hajoamisen viimeistä vaihetta nimitetään metanogeneesiksi. Metanogeenit tuottavat metaania ja hiilidioksidia, eli biokaasua, asetaatista, vedystä ja hiilidioksidista. Asetaattia käyttäviä metanogeenijä kutsutaan asetiklastisiksi tai asetotrofisiksi (esim. *Methanosarcina* ja *Methanosae-ta*) ja vetyä käyttäviä hydrogentrofisiksi (esim. *Methanobacterium* ja

*Methanococcus*). Metaanimuodostuksesta noin 70 % on arvioitu tapahtuvan asetaatin kautta, eli asetotrofisten metanogeenien toimesta. Asetotrofiset metanogeenit kasvavat hitaasti, kahdentumisajan vaihdella 2–12 vrk:n välillä. Tällä on merkitystä mm. jatkuvasekoitteen biokaasureaktorin viipymääjan määrittämisessä: liian lyhyt viipymäaika johtaa hitaasti kasvavien metanogeenien uloshuuhtoutumiseen.



$\Delta G$ , kJ/reaktio (pH 7,0, T=25°C)

Reaktiot: Propionaatti vedyksi ja asetaatiksi  
Butyraatti vedyksi ja asetaatiksi  
Metaanin muodostuminen vedystä

Kuvio 4.3 Vetytitoisuuden vaikutus rasvahappojen hajoamisen ja metaanin muodostumisen kannalta. Kuvio mukaeltu lähteestä Deublein ja Steinhauser, 2008. Reaktio on mahdollinen, kun sen Gibbsin energia-arvo (delta G) on negatiivinen. Kuvassa butyraatin ja propionaatin hajoaminen vedyksi on mahdollinen, kun vetytitoisuus (eli näiden reaktioiden tuotepitoisuus) on alhainen, esim. propionaatille  $p_{H_2}$  on oltava tässä alle 0,0001 bar eli 0,1 mbar. Toisaalta metaanin muodostuminen vedystä on mahdollinen, kun vetytitoisuus (eli tämän reaktion syötepitoisuus) on riittävä, tässä vähintään n. 0,001 mbar. Näin ollen termodynaamisesti anaerobinen hajoaminen toimii tasapainossa kapeassa vetytitoisuusikkunassa, tässä välillä 0,001–0,1 mbar.

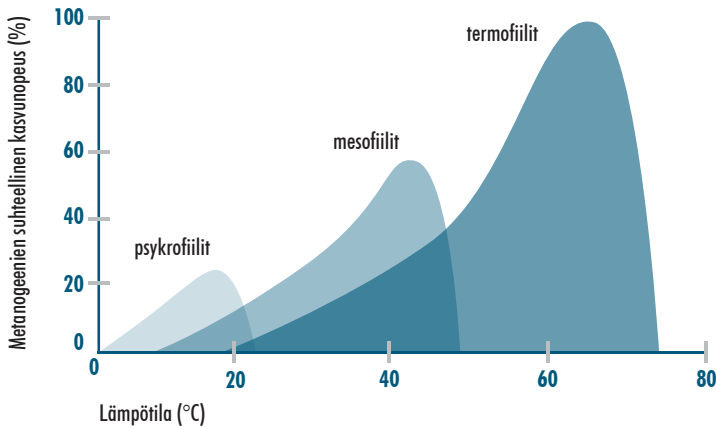
## 4.2 Prosessin toimintaedellytykset

Edellä kuvattu tasapainoinen hajoamisprosessi vaatii tietyt toimintaolosuhteet, kuten hapettomuus, sopiva lämpötila ja pH. Ravitsemukselliset olosuhteet määräytyvät syötteiden koostumuksen ja hajoamisen seurauksena, mitä on kuvattu edellä luvussa 2.1. Tässä luvussa tätä tarkennetaan inhiboivien ja toksisten tekijöiden osalta.

### 4.2.1 Lämpötila

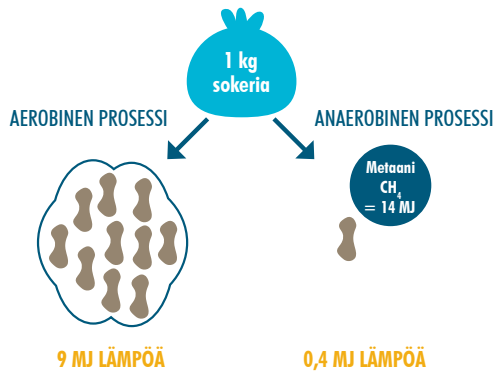
Lämpötila on yksi merkittävin biokaasutuotantoon vaikuttavista tekijöistä. Lämpötilan suhteen prosessit ovat käytännössä mesofiilisiä tai termofiilisiä. Mesofiilisessä prosessissa lämpötila on tyypillisesti välillä

35–43 °C ja termofiilisessä välillä 50–55 °C. Sopiva lämpötila voi siis käytännössä asettua melko laajalle lämpötilavälille (Kuvio 4.4). Absoluuttista lämpötilaa tärkeämpi onkin lämpötilan tasaisuus: lämpötilavaihtelu olisi hyvä pitää mahdollisimman pienenä, mieluummin +/- 0,5 ja maksimissaan +/- 2 °C. Metanogeenit ovat muita mikrobeja herkempiä lämpötilavaihtelulle. Termofiiliset metanogeenit ovat mesofiilejä herkempiä, mutta toisaalta niiden suhteellinen kasvunopeus on suurempi (Kuvio 4.4). Meso- ja termofiilisistä biokaasuprosesseista kerrotaan tarkemmin luvussa 5.



Kuvio 4.4 Metanogeenien suhteelliset kasvunopeudet lämpötilan suhteen.

Toisin kuin aerobisessa kompostointiprosessissa, anaerobisessa hajoamisessa energia sitoutuu pääosin metaaniin, eikä vapaudu lämpönä (Kuvio 4.5). Prosessi tarvitsee siis useimmiten ulkoisen lämmönlähteen. Käytännössä lämmöntuonti toteutetaan esim. syötteen esilämmityksellä ja/tai käyttämällä reaktorilämmitystä. Lisäksi reaktorit ovat eristettyjä. Lämpötilan tasaisuuteen vaikutetaan myönteisesti myös hyvällä sekoituksella.



Kuvio 4.5 Energiatuotanto aerobisessa kompostointi- ja anaerobisessa biokaasuprosesseissa. Kuvio mukaeltu lähteestä Schnürer ja Jarvis, 2009.



### 4.2.2 pH ja alkaliniteetti

Lämpötilariippuvuuden lisäksi mikrobiaktiivisuus riippuu pH:sta eli happamuutta/emäksisyyttä vastaavista olosuhteista. Tyypillisesti biokaasureaktorin pH on lähellä neutraalia, välillä pH 7–8. Eri mikrobeilla on kuitenkin erilaiset pH-optimi. Anaerobisen hajoamisen alkuvaiheen (hydrolyysi, asidogeneesi) mikrobien pH-optimialue on edellä mainittua alhaisempi, eli happamalla alueella, välillä pH 4,5–6,5. Metanogeenit taas vaativat korkeampaa pH:ta, yli pH 6,7, muttei toisaalta yli pH 8,5. Näin ollen yhdessä vaiheessa toteutettavan prosessin pH on kompromissi niin, että kaikkien hajoamisvaiheiden mikrobit toimivat, vaikkeivat olekaan ihan optimiolosuhteissa.

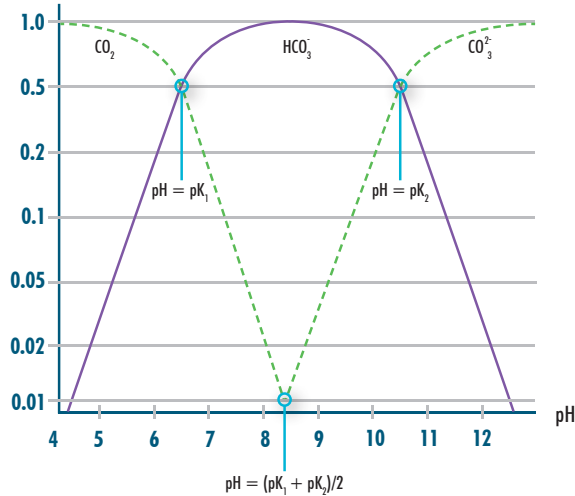
Biokaasureaktorin pH asettuu tyypilliselle tasolle, joka määräytyy syötteen ja siitä syntyvien happamien ja emäksisten hajoamistuotteiden sekä hiilidioksidin osapaineen perusteella. Hiilihydraattipitoiset syötteet vaikuttavat pH:ta alentavasti johtuen niiden hajoamisessa syntyvistä hapoista. Vastaavasti proteiinipitoiset syötteet vaikuttavat pH:ta nostavasti johtuen syntyvästä ammoniakista. Hajoamistuotteena syntyvän hiilidioksidin vaikutusta on kuvattu tarkemmin alla, liittyen sen pH:ta vaikuttavaan vaikutukseen.

Hyvin toimivan biokaasureaktorin pH pysyy vakiotasolla. Tähän vaikuttaa reaktorisäädön hyvä puskurikyky eli kyky neutraloida muodostuvia happoja, näin estäen niiden vaikutuksen pH-arvoon. Tätä kykyä mitataan alkaliniteettiarvolla: mitä korkeampi alkaliniteetti sen parempi puskurikyky, ja täten pienempi riski pH-vaihteluihin.

Reaktorisäädön puskurikykyyn vaikuttaa eniten bikarbonaatti-karbonaattipuskurisysteemi. Kuviossa 4.6 on esitetty hiilidioksidi ( $\text{CO}_2$ )–bikarbonaatti ( $\text{HCO}_3^-$ )–karbonaatti ( $\text{CO}_3^{2-}$ )-tasapaino pH:n suhteen. Anaerobihajoamisessa muodostuva hiilidioksidi liukenee veteen muodostaen hiilihappoa, joka edelleen ionisoituu bikarbonaattimuotoon. Esimerkiksi proteiinien hajotessa reaktorissa syntyvä ammoniakki reagoi liunneen hiilidioksidin kanssa muodostaen ammoniumbikarbonaattia, täten parantaen liuoksen alkaliniteettiä.  $\text{CO}_2$ :n liukenevuus veteen heikkenee lämpötilan noustessa, mikä osaltaan johtaa siihen, että termofiiliprosessin pH on tyypillisesti mesofiiliprosessia korkeampi.

Hyvällä alkaliniteetillä estetään reaktorin pH-vaihteluja, jotka olisivat haitallisia mikrobitoiminnalle. Esimerkiksi, kun hajoamisprosessissa muodostuu happoja, haihtuvia rasvahappoja (VFA), liuoksessa olevat bikarbonaatti-ionit neutraloivat nämä hapot, eikä liuoksen pH pääse laskemaan näiden happojen vaikutuksesta. Jos happoja on liikaa, eikä liuoksen puskurikyky riitä näitä neutraloimaan, pH laskee. Liian korkea happopitoisuus voi johtua näiden runsaasta muodostumisesta ja kerty-

misestä epätasapainoisen hajoamisprosessin seurauksena: happoja ei kuluteta sitä vauhtia kuin niitä syntyy. Tässä tapauksessa prosessimittaukset osoittavat VFA-arvojen kohoamista ja alkaliniteettiarvon laskua ennen kuin pH-arvossa tapahtuu muutoksia. Käytännössä reaktorin pH asettuu luonnostaan sopivalle tasolle eikä ulkoista pH-säätöä tarvita. Häiriötilanteissa pH-säätöä voidaan tarvita. Näitä keinoja on esitetty tarkemmin luvussa 4.3.4.



Kuvio 4.6 Hiilidioksidi – vetykarbonaatti – karbonaatti -tasapaino pH:n funktiona.

Biokaasureaktorien alkaliniteettiarvoissa on käytännössä suurta vaihtelua, alkaen muutamasta tuhannesta useisiin tuhansiin  $\text{mgCaCO}_3(\text{litra})^{-1}$  arvoon, välillä 2 000 – 13 000  $\text{mgCaCO}_3(\text{litra})^{-1}$ . Tätä arvoa suhteutetaan VFA-pitoisuuteen, ja stabiilin hajoamisprosessin varmistamiseksi VFA/alkaliniteetti-suhteen suositellaan olevan alle 0,3.

#### 4.2.3 Ravinteet ja hivenaineet

Ravinteet ovat välttämättömiä solujen energian ja kasvun lähteitä. Anaerobisen hajoamisprosessin pääravinnevaatimuksia (C, N, P, S) ja ravinteiden hallintaa käytännössä on kuvattu edellä luvussa 2.1.2.

Pääravinteiden lisäksi hivenaineet (mm. Ni, Co, Mo, Fe, Se, Zn, Cu, Mn, Wo) ovat tärkeitä mm. solujen rakennusaineina ja entsyymitoiminnassa. Näiden merkitys on osoitettu useissa tieteellisissä julkaisuissa, mutta käytännössä näiden hallintaan on alettu kiinnittää huomiota vasta viime vuosina, tavoitteena tehostaa prosessia maksimoimalla kuormitus- ja tuotto-tasoa.

Hivenainepitoisuuksia voi helposti analysoida reaktorinäytteestä. Käytännössä pitoisuustieto ei kuitenkaan yksin riitä osoittamaan, ovatko nämä hivenaineet biosaatavia eli mikrobien käytössä. Tämä voidaan varmistaa kokeellisesti testaamalla hivenainelisäyksen vaikutusta prosessin toimintaan. Prosessin ollessa hivenainerajoitteinen hivenainelisäys on tarpeen, kun tavoitellaan prosessin maksimaalista tehoa ja stabiilisuutta. Yksipuolisia syötteitä, kuten kasvibiomassaa tai tiettyjä teollisuuden orgaanisia jätteitä käsittelevät prosessit kärsivät hivenainepuutetta selvästi yleisemmin kuin lantapohjaiset ja useita erilaisia jakeita käsittelevät prosessit. Esimerkiksi teurasjätteen laboratoriomittakaavan koeajoissa hivenaineiden lisäyksen ansiosta haihtuvia rasvahappoja ei kertynyt, prosessi toimi vakaammin ja sitä pystyttiin ajamaan korkeammalla kuormituksella kuin reaktoria, johon hivenaineita ei lisätty (Bayr ym. 2012).

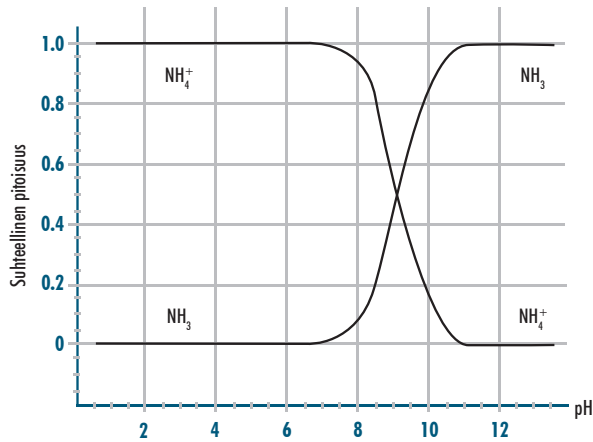
#### 4.2.4 Inhibiivat ja toksiset aineet

Anaerobista hajoamista ja täten biokaasutuottoa inhibiivia ja sille toksisia aineita ja yhdisteitä tulee prosessiin joko syötteiden mukana tai niiden hajoamisen seurauksena. Käytännössä on todettu näiden negatiivinen vaikutus prosessiin hyvinkin erilaisilla pitoisuuksilla. Tarkkojen raja-arvopitoisuuksien esittäminen näille aineille ja yhdisteille onkin vaikeaa, johtuen mm. niiden erilaisesta sitoutumisesta, kuten inhibiivien metallien saostuminen heikkoliukoisina suoloina (sulfideina, karbonaateina). Haitallisuus riippuu myös muista ympäristöolosuhteista (lämpötila, pH, reaktorisisällön koostumus). Toisaalta raja-arvopitoisuuteen vaikuttaa myös prosessin mahdollinen adaptoituminen eli mikro-organismien kyky sopeutua vähitellen nouseviin haitallisiin pitoisuuksiin.

Inhibitiota aiheuttavista aineista yleisimmin seurattavia ovat hajoamisessa muodostuvat ammoniakki, rikkivety ja rasvahapot. Lisäksi tunnetaan useita inhibitiota aiheuttavia metalleja, raskasmetalleja ja hivenaineita. Biologiselle prosessille haitallisia ovat luonnollisesti myös antibiootit, desinfiointiaineet, pestisidit ja korkeat suolapitoisuudet.

#### Ammoniakki

Ammoniakki on mikrobeille tärkeä typpiravinne, jonka pääasiallisena lähteenä ovat proteiinipitoiset syötteet ja urea. Ammoniakki esiintyy liuoksessa joko liuenneena vapaana ammoniakkina ( $\text{NH}_3$ , aq) tai ammoniumioni ( $\text{NH}_4^+$ ) muodossa, joiden suhteellinen määrä riippuu liuoksen pH:sta (Kuvio 4.7) ja lämpötilasta. Lämpötilariippuvuutta on kuvattu tarkemmin kirjan luvussa 6.3.2, jossa käsitellään mädätysjäännöksensä erotetun nestejakeen strippausta (kuviot 6.2 ja 6.3).



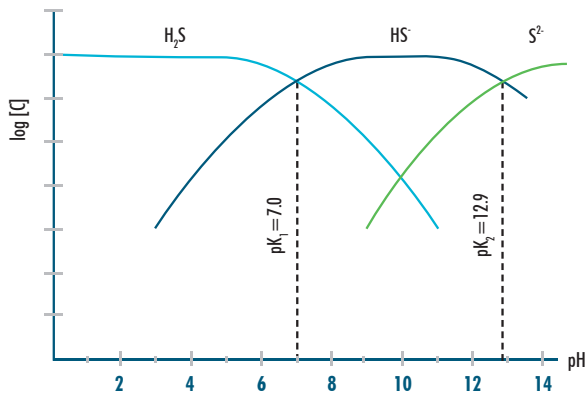
Kuvio 4.7 Ammoniakin ionisoituneen (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) ja ionisoitumattoman (NH<sub>3</sub>) muodon välinen tasapaino pH:n funktiona. Lämpötilan nousu lisää NH<sub>3</sub>:n osuutta (ks. Kuvio 6.3).

Liuenut NH<sub>3</sub> inhiboi mikrobitoimintaa selvästi alhaisemmissa pitoisuuksissa kuin ionimuotoinen NH<sub>4</sub><sup>+</sup>. Varaukseton muoto kulkeutuu helpommin solun sisään, ja on täten haitallisempi. Inhibiatio kohdistuu etenkin metanogeneeihin, mikä johtaa nopeasti prosessihäiriöön. Koska NH<sub>3</sub>:n suhteellinen osuus kasvaa pH:n ja lämpötilan kasvaessa, niin sekä korkea pH että lämpötila molemmat herkistävät prosessia ammoniakki-inhibitiolle. Inhibitiota aiheuttavista pitoisuuksista on julkaistu paljon tutkimustuloksia. Tulokset ovat olleet vaihtelevia: raja-arvot ovat vaihdelleet välillä 1,5–10 gNH<sub>4</sub>-N (litra)<sup>-1</sup>, ja ammoniakille huomattavasti alhaisemmissa pitoisuuksissa, välillä 30–100 mgNH<sub>3</sub> (litra)<sup>-1</sup>, josta raja-arvona esitetään yleisesti 80 mgNH<sub>3</sub> (litra)<sup>-1</sup>. Vaihtelua aiheutuu paitsi olosuhteista ja niiden vaikutuksesta haitallisen vapaan ammoniakin määrään, niin myös mikrobikannan adaptoitumisesta korkeampiin pitoisuuksiin. Käytännössä biokaasureaktoreissa pitoisuudet välillä 3–5 gNH<sub>4</sub>-N(litra)<sup>-1</sup> ovat yleisiä hyvin toimiville prosesseille.

Ammoniakki-inhibiatio on tyypillisesti riskinä, kun syöte on hyvin typpipitoista. Tällaisia syötettä ovat mm. sian- ja kananlanta ja teurasjätteet. Ongelmia aiheutuu erityisesti silloin, jos syötteen typpipitoisuus äkillisesti kasvaa. Tähän on syynä prosessin hidaskäynnistyminen korkeille ammoniakkipitoisuuksille.

### Rikkivety, H<sub>2</sub>S

Rikkivetyä syntyy anaerobisessa hajoamisessa rikkipitoisista syötteistä, mm. proteiineista (aminohapot: kysteiini, metioniini). Sitä muodostuu myös sulfaattia pelkistävien bakteerien reaktiotuotteena. Rikkivety, H<sub>2</sub>S, esiintyy liuoksessa tasapainossa vetysulfidi-ionimuodon (HS<sup>-</sup>) kanssa. Toksisen H<sub>2</sub>S-muodon osuus kasvaa pH:n laskiessa (Kuvio 4.8). Toksiseksi pitoisuusrajoiksi on raportoitu arvoja välillä 30–400 mgH<sub>2</sub>S (litra)<sup>-1</sup>.



Kuvio 4.8 Rikkivedyn ja rikki-ionien välinen tasapaino pH:n funktiona.

Suoran rikkivetyinhibition ohella sulfidilla on myös muita haitallisia vaikutuksia. Sulfidi (S<sup>2-</sup>)-ionit muodostavat metallien kanssa saostumia eli sitovat mm. prosessille välttämättömiä hiivenaineita. Toisaalta, liuoksen korkeat rikkivetypitoisuudet näkyvät myös kaasufaasissa eli biokaasun korkeina, korrodoivina rikkivetypitoisuuksina.

### Rasvahapot, LCFA

Rasvapitoiset raaka-aineet hajoavat anaerobisessa prosessissa pitkäketjuisiksi rasvahapoiksi (LCFA, Long Chain Fatty Acids) ja glyseroliksi. Pitkäketjuisuus tarkoittaa, että hiiliketjussa on vähintään 14–16 hiiliatomia (esim. steariini-, palmitiini- ja linoleenihappo). Rasvahappojen hajoaminen edelleen tapahtuu syntrofisessa yhteydessä vetyä kuluttavien metanogeenien kanssa, vastaavasti kuin edellä on esitetty VFA-yhdisteille (Kuvio 4.3). Näin ollen, kun näiden metanogeenien toiminta häiriintyy, LCFA-yhdisteet alkavat akkumuloitua prosessiin. Korkeissa pitoisuuksissa yhdisteet inhiboivat metanogeeniä ja muitakin mikrobeja. Esim. oleiini- ja steariinihappojen inhibitiopitoisuudelle on todettu raja-arvoja välillä 0,2–0,5 g (litra)<sup>-1</sup>. Termofiiliprosessit on todettu herkemiksi kuin mesofiiliprosessit.

LCFA-inhibitio on tyypillisesti riskinä, kun syöte on hyvin rasvapitoista. Tällaisia syötteitä tulee tyypillisesti elintarviketeollisuudesta, mm. rasvakaivolietteet, ravintoloiden ym. jäteöljyt ja teurasjätteet. Ongelmia aiheutuu erityisesti silloin, kun näiden osuus syöteseksossa äkillisesti kasvaa. Inhibitiovaikutuksen lisäksi LCFA-yhdisteillä on pinta-aktiivisia ominaisuuksia, mikä voi johtaa helposti vaahdon muodostumiseen. Tätä voi muodostua jo rasvajätteen kuljetuksen ja varastoinnin aikana etenkin lämpimissä olosuhteissa, kun rasvan hydrolyysi LCFA:ksi käynnistyy jo ennen reaktoria. Rasvajäte on hyvä metaanituottaja, mutta sen syötöä reaktoriin on tarkoin hallittava edellä mainittujen ongelmien välttämiseksi.

Lyhytketjuiset rasvahapot eli VFA-yhdisteet, joissa hiiliketjun pituus on alle 18 hiiliatomia, ovat LCFA-yhdisteiden tavoin prosessin hajoamistuotteita. Näiden epäsuorista inhibiiovaikutuksista ja merkityksestä prosessihallinnan kannalta on kerrottu tarkemmin luvussa 4.3.5.

### **Metallit**

Tiettyjen metallien roolia tärkeinä, välttämättöminä hivenaineina on esitelty edellä. Samoilla metalleilla voi korkeimmissa pitoisuuksissa olla kuitenkin inhiboivia vaikutuksia. Tällaisia metalleja ovat ainakin Fe, Zn, Cu, Cr, Mn, Mo, Ni ja Se, ja lisäksi inhiboivia raskasmetalleja ovat Pb, Hg ja Cd.

Samoista syistä kuin edellä todettiin vaikeaksi määrittää riittäviä hivenainepitoisuuksia, niin on myös vaikea antaa metallien inhiboiville pitoisuuksille raja-arvoja. Metallit voivat esiintyä sitoutuneina (esim. sulfideina, karbonaateina) niin, etteivät ne ole biosaatavia, jolloin niillä ei myöskään ole inhiboivaa vaikutusta. On myös todettu, että tietyt metallit voivat joko vahvistaa tai heikentää toisten metallien inhibiiovaikutusta. Tutkimuksissa on todettu vaihtelevia inhibiioraja-arvoja, jotka ovat tyypillisesti muutama kymmenen mg (litra)<sup>-1</sup> tai muutamia satoja mg (litra)<sup>-1</sup> -pitoisuuksia.

### **Suolat (kationit)**

Korkeat suolapitoisuudet inhiboivat mikrobitoimintaa. Biokaasureaktoriin suoloja (kationeja Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>) tulee joko suolaisen syötteen mukana esim. elintarviketeollisuudesta tai alkalisista kemikaaleista (esim. NaOH), joita on voitu käyttää mm. pH-säätöön.

Mikrobeilla on kyky sopeutua ja valikoitua niin, että ne pärjäävät suolaisissa olosuhteissa. Pärjäämistä voi myös edistää osmolyyttisäyksellä eli aineella, joka ylläpitää solun vesitasapainoa ja stabiloi näin solua korkeissa suolapitoisuuksissa. Tällaisia aineita ovat glysiini, betaiini ja koliini. Käytännössä näiden käytöstä ei ole tietoa laitosmittakaavassa.

Inhiboivat suolapitoisuudet ovat selvästi korkeampia kuin edellä esitetyt metallipitoisuudet yleensä. Inhibiioipitoisuudet ovat tyypillisesti useita tuhansia mg litra<sup>-1</sup>-arvoja, esim. natriumille välillä 5 000 – 15 000 mg (litra)<sup>-1</sup> eli 5 – 15 g (litra)<sup>-1</sup>.

### **Antibiootit, desinfiointiaineet ja detergentit**

Antibiootit ja desinfiointiaineet on tehty inhiboimaan tai tuhomaan mikrobeja, joten niiden haitallisuus biokaasureaktorissakin on ilmeinen. Käytännössä antibioottiongelma on ilmennyt lantamädättämissä. Desinfiointiaineita puolestaan on merkittävimmin elintarviketeollisuuden jäte-

vesissä. Prosessi kestää näitä pieniä määriä, ja anaerobisen käsittelyprosessin on todettu jopa hajottavan joitain antibiootteja.

Detergentit ovat pinta-aktiivisia aineita, joista yksi yleisin on LAS (lineaarinen alkyylibentseeni sulfonaatti). LAS:n on todettu inhiboivan anaerobista mikrobitoimintaa. Detergenttejä on saatettu käyttää mm. jätevedenpuhdistamolla, josta niitä kulkeutuu mädätettävään lietteeseen.

### **Metanogeenien kilpailijat**

Metaanin tuotantoa voivat häiritä mikrobit, jotka kilpailevat samoista orgaanisista lähtöaineista metaania tuottavien ja fermentoivien mikrobien kanssa. Näitä ovat sulfaattia ja nitraattia pelkistävät bakteerit. Näiden toiminta luonnollisesti lisääntyy sulfaatti- ja nitraattipitoisuuksien kasvun myötä. Reaktioiden tuloksena syntyy rikkivetyä  $H_2S$  (sulfaatista) ja tyyppiä  $N_2$  ja typpioksiduulia  $N_2O$  (nitraatista). Reaktioiden vaikutus korostuu, kun orgaanisen aineen pitoisuudet laskevat eli kun orgaanisen aineen ja sulfaatin tai nitraatin pitoisuuksien suhde laskee.

Biokaasuprosessin kannalta korkeita sulfaattipitoisuuksia on todettu syötteissä, jotka ovat peräisin mm. tislaamoilta (etanolirankki) ja sellu- ja paperiteollisuudesta, johtuen näissä prosesseissa käytetyistä rikkikemikaaleista.

## **4.3 Prosessihallinta**

Biokaasuprosessin hyvällä hallinnalla saavutetaan maksimaalinen ja tasainen biokaasutuotto ja hyvälaatuinen lopputuote jatkokäsittelyyn. Prosessihallinta alkaa syötetuntemuksesta ja sopivan syöteseoksen vallinnasta. Tätä on kuvattu edellä luvussa 2.1. Raaka-aineiden valinta ja hallinta. Raaka-aineeseen liittyen on hallittava myös reaktorin syöttöä, orgaanista kuormitusta (OLR, organic loading rate) ja viipymäaika (HRT, hydraulic retention time). Kullekin syötteelle sopivien OLR- ja HRT-arvojen valinta perustuu kokeellisiin esitutkimuksiin. Syöteanalyysitietoja ja esitutkimuksia tarvitaan jo prosessin suunnittelu- ja mitoitusvaiheessa. Jatkuvassa prosessiseurannassa niiden tarve korostuu syöte- tai muissa olosuhdemuutostilanteissa.

Biokaasureaktorin jatkuva prosessiseuranta sisältää tyypillisesti vain muutamia on-line-mittauksia, kuten biokaasutuottomäärä, metaanipitoisuus, reaktorilämpötila, pH ja pinnankorkeus. Tarkempaa prosessiseurantaa tehdäänkin pääosin näytteenottojen ja laboratorioanalyysien avulla.

### 4.3.1 Orgaaninen kuormitus, OLR

Reaktorin orgaanisella kuormituksella (Organic Loading Rate, OLR) tarkoitetaan reaktorin toimintatilavuutta ( $\text{m}^3$ ) kohden syötettyä orgaanisen aineen määrää vuorokaudessa ( $\text{kgVS} (\text{m}^3\text{vrk})^{-1}$ ).

#### ESIMERKKILASKENTA

Syöte biojäte-lieteseos, TS-pitoisuus = 12 % ja VS-pitoisuus = 8 %  
eli syötteen orgaanisen aineen pitoisuus on  $80 \text{ gVS kg}^{-1}$  eli  $80 \text{ gVS (litra)}^{-1}$ , kun tiheys =  $1 \text{ kg (litra)}^{-1}$ .  
Reaktoriin, jonka toimintatilavuus on  $4 \text{ m}^3$ , syötetään  $200 \text{ litraa vrk}^{-1}$   
Saadaan OLR-arvoksi =  $(200 \times 0,08) \text{ kgVS vrk}^{-1} / 4 \text{ m}^3 = 4 \text{ kgVS} (\text{m}^3\text{vrk})^{-1}$

Käytännössä prosessi mitoitetaan toimimaan tietyllä hyväksi todetulla kuormitusarvolla. Kun tiedetään käsiteltävä syötemäärä, eli käsittelykapasiteetti, joka reaktorilta vaaditaan, ja syötteen VS-pitoisuus, saadaan laskettua tarvittava reaktorikoko. Tällöin edellä esitetty laskenta etenee seuraavasti:

#### ESIMERKKILASKENTA

$OLR = 4 \text{ kgVS} (\text{m}^3\text{vrk})^{-1}$   
Syötemäärä  $200 \text{ litraa vrk}^{-1}$  ja syötteen VS-pitoisuus  $80 \text{ gVS (litra)}^{-1}$ .  
Saadaan tarvittavaksi reaktoritilavuudeksi  
 $V_{\text{reaktori}} = (200 \times 0,08) \text{ kgVS vrk}^{-1} / 4 \text{ kgVS} (\text{m}^3\text{vrk})^{-1} = 4 \text{ m}^3$

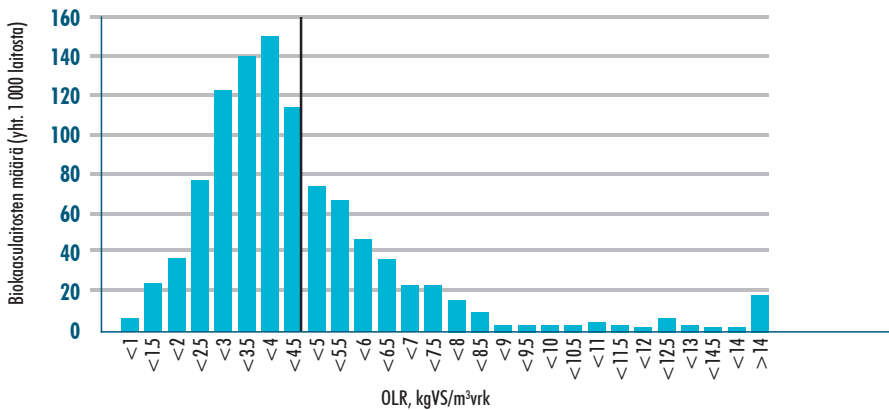
Tämä tilavuus vastaa reaktorin toimintatilavuutta eli reaktorisäilytysvolumin tilavuutta. Käytännössä esim. CSTR-reaktoreissa jätetään kaasutilavuutta nestetilavuuden yläpuolelle tyypillisesti noin 15–20 %, jolloin mitoitustilavuudeksi saadaan  $1,2 \times 4 \text{ m}^3 = 4,8 \text{ m}^3$

Mikä on sopiva OLR-arvo? Mitä korkeampi kuormitus, sitä paremmin reaktoritilavuus on käytössä ja reaktorin käsittelykapasiteetti on suurempi, koska syötetään enemmän reaktoritilavuutta kohti. Toisaalta, mitä korkeampi kuormitus, sitä korkeammat pitoisuudet reaktorissa, mikä pätee myös inhibiittoreihin. Kuten edellä todettu, vaikka inhibiittoripitoisuuksia voidaan laskennallisesti arvioida syötteiden pitoisuuksista, niiden haitallisuus tulee varmuudella esiin vasta käytännössä. Kuormituksen kasvaessa ruoan/syötteen määrä käytettävissä olevaa aktiivista mikrobistoa kohti kasvaa ja saavuttaa lopulta rajan, jossa reaktorin ns. metabolinen kapasiteetti ei enää riitä syömään eli hajottamaan sinne syötettyä orgaanista ainetta. Tarvitaankin käytännön koetoimintaa, kuormitustestausta, jolla haetaan sopiva ja maksimaalinen kuormitustaso kyseisellä syöt-



teellä kyseisissä olosuhteissa. Kuormitusta nostetaan vähitellen ja seurataan vaikutusta biokaasutuottoon ja prosessin stabiilisuuteen (Ks. Kuvio 4.11). Sopiva kuormitus riippuu paitsi syöttestä, myös olosuhteista ja toimivasta mikrobistosta, sen adaptoitumisesta valitseviin olosuhteisiin.

Käytännössä OLR-arvoissa on vaihtelua biokaasulaitosten välillä. Kuviossa 4.9 on esitetty 1000 saksalaisen maatilatason laitoksen kuormitus-  
tasojen jakautuminen, kun syötteenä on lanta, yhdistettynä peltobiomas-  
saan. Keskiarvoksi on saatu 4,4 kgVS ( $\text{m}^3\text{vrk}$ )<sup>-1</sup>. Pelkkää lantaa käyttä-  
vissä reaktoreissa Suomessa tyypillinen kuormitus on vähän alempi, n.  
2 – 3 kgVS ( $\text{m}^3\text{vrk}$ )<sup>-1</sup>. Yleisesti, kuormitusarvot välillä 4 – 5 kgVS ( $\text{m}^3\text{vrk}$ )<sup>-1</sup>  
ovat tyypillisiä märkäprosessien arvoja esim. isoilla biokaasulaitoksilla,  
joissa yhteiskäsitellään biojätteitä ja lietettä.



Kuvio 4.9 Saksalaisten maatilatason biokaasulaitosten kuormitusarvoja (1000 laitoksen otos). Kuvio mukaeltu esityksestä Hölker, U., International Biogas Training Course, Stuttgart, 2009.

Syötteiden biohajoavuus vaihtelee, ts. syötteen orgaanisesta aineesta hajoaa reaktorissa eri määriä. Helposti hajoavilla tärkkelys- ja sokeripitoisilla syötteillä hajoamisaste voi olla jopa 90 %, kun taas lannalla vain n. 40 %. Vastaava OLR-arvo johtaakin näillä syötteillä hyvin erilaiseen hajoavan orgaanisen aineen määrään reaktorissa. Vastaavasti, edellä mainittu reaktorin metabolinen kapasiteettiraja saavutetaan näillä syötteillä hyvinkin erilaisilla OLR-arvoilla.

Käytännössä on suositeltavaa ajaa biokaasureaktoria mahdollisimman tasaisella kuormituksella ja vakiosyötöllä. Syötteen muutostilanteessa kuormitusta on hyvä laskea, kunnes prosessi sopeutuu uuteen syötekoostumukseen.

### 4.3.2 Viipymäaika, HRT

Prosessin viipymäaika (Hydraulic Retention Time, HRT) määritellään reaktori- ja syöttötilavuuksien suhteena (yhtälö 4.1). Se on laskennallinen aika, joka kestää korvata koko reaktoritilavuus. Täyssekoitteisessa reaktorissa tämä aika ei vastaa todellisuutta, koska reaktorisäällön laadullinen korvautuminen uudella tapahtuu hitaammin.

$$\text{HRT} = V_{\text{reaktori}} / V_{\text{syöttö}} \quad (\text{Y4.1})$$

$V_{\text{reaktori}}$  = reaktorin tilavuus [m<sup>3</sup>]

$V_{\text{syöttö}}$  = syöttötilavuus [m<sup>3</sup> vrk<sup>-1</sup>]

Edellä, orgaanisen kuormituksen yhteydessä esitetyn laskentaesimerkin tapauksessa HRT-arvoksi saadaan 20 vrk (= 4 m<sup>3</sup> / 0,2 m<sup>3</sup> vrk<sup>-1</sup>).

Viipymäaika voidaan määrittää myös Solid Retention Time (SRT) -käsitteellä. Kun reaktorissa ei ole mädätteen kierrätystä HRT = SRT, mikä on yleisin tapaus. Jos osa mädätteestä kierrätetään, osa kiintoaineesta ja täten mikrobimassasta kiertää ja viipyy systeemissä pidempään, jolloin SRT > HRT.

Mikä on sopiva viipymäaika? Sopiva viipymäaika riippuu paitsi syötteestä ja olosuhteista, niin reaktorityypistä ja prosessin tavoitteesta: kuinka pitkälle halutaan viedä orgaanisen aineen hajoaminen reaktorissa.

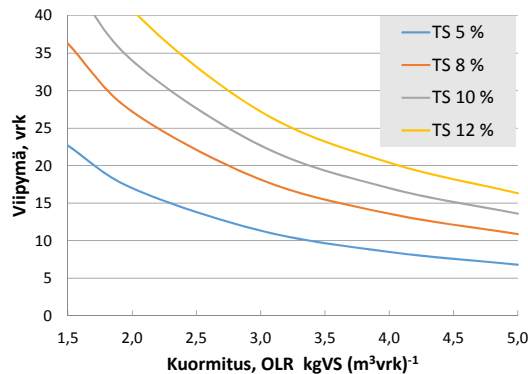
Mitä helpommin hajoava syöte, sitä lyhyempi viipymä luonnollisesti riittää saavuttamaan haluttu hajoamisaste ja sitä vastaava biokaasutuotto. Jätevesille, joissa metaanituottoon osallistuva orgaaninen aines on valmiiksi liuenneena, riittää viipymäksi 1–2 vrk. Hitaasti hajoava kuitumainen raaka-aine kuten peltobiomassa (energiakasvit) vaatii hajotukseen yleensä 30–50 vrk ja jopa yli sadan päivän viipymiä on käytössä. Biojätteillä ja lietteillä sopiva viipymäaika on tyypillisesti jotain tältä väliltä, n. 15–20 vrk, ja lannalle n. 20–30 vrk. Termofiliolosuhteissa hajoaminen on nopeampaa, ja vastaavasti viipymäajat voivat olla käytännössä muutamia päiviä lyhyempiä verrattuna mesofiliiprosesseihin. Viipymäajalla, lämpötilan ohella, on myös vaikutusta patogeenien tuhoutumiseen (Ks. Kuvio 6.1).

Täyssekoitteisessa systeemissä (CSTR) on riski, että lyhyellä viipymällä huuhdellaan aktiivinen mikrobisto poisteen mukana pois reaktorista, toisin sanoen, mikrobit kasvavat ja uusiutuvat hitaammin kuin niitä poistetaan. Hitaammin uusiutuvia ovat metanogeenit, minkä perusteella on määrätynyt minimiviipymä CSTR-reaktorissa, noin 10–12 vrk. Jos mikrobit eivät poistu reaktoripoisteen mukana, kuten esim. lietepatja- ja

kantaja-aineellisissa systeemeissä, niin tämä rajoite ei luonnollisestikaan päde, ja voidaan toimia hyvinkin lyhyillä viipymillä. Näissä sovelluksissa myös syötteen orgaaninen aines on jo valmiiksi liuennutta, jolloin kyseessä on tyyppillisesti jätevesien käsittely (Ks. luku 1.2).

#### 4.3.3 HRT vs. OLR

Reaktorin orgaaninen kuormitus ja viipymä luonnollisesti riippuvat toisistaan. Korkeamman kuormituksen myötä reaktoriin syötettävä määrä kasvaa, mikä johtaa viipymäajan lyhenemiseen. Viipymäaika lyhenee sitä enemmän, mitä vesipitoisempi syöte on eli mitä alhaisempi on sen TS-, ja täten myös VS-pitoisuus. Kuviossa 4.10 on esitetty CSTR-reaktorin kuormituksen ja viipymän välinen riippuvuus syötteen eri TS-pitoisuuksilla, kun syötteen VS/TS-suhde on 68 %. Tämä suhde on tyyppillinen suomalaisten lietemädättämöjen lietesyötteille. Huomioiden edellä mainittu viipymävaatimus 12 vrk, voidaan arvioida maksimikuormitus tietyn TS-pitoisuuden omaavalla syötteellä. Kuvion 4.10 mukaisesti 5 %:n TS-pitoisuudella maksimikuormitus on n. 3 kgVS (m<sup>3</sup>vrk)<sup>-1</sup>. Jos kuormitus halutaan nostaa arvoon 5 kgVS (m<sup>3</sup>vrk)<sup>-1</sup>, syötteen TS-pitoisuutta on nostettava yli 8 %:iin, jotta säilytetään edelleen 12 vrk:n viipymä.



Kuvio 4.10 Kuormituksen ja viipymän välinen riippuvuus syötteen eri kuiva-ainepitoisuuksilla (tässä syötteen VS/TS-suhde 68 %). (Kymäläinen ym., 2014).

#### 4.3.4 Prosessimittaukset ja analyysit

Prosessin monitoroinnin ja ohjauksen avulla hallitaan ja tehostetaan prosessin toimintaa ja pyritään näin välttämään prosessihäiriö- ja turvallisuusriskejä. Perinteisesti biokaasulaitoksilla on ollut käytössä suhteellisen vähän suoria on-line-mittauksia, tietokonepohjaista monitorointia ja automaattiohjausta. Tästä johtuen laitostehot ovat jääneet vajaatehoisiksi. Nykyään automaatiojärjestelmä on yksi keskeinen osa turvallista laitostoimintaa. Tällä hallitaan kaikkia prosessivaiheita: syötteen

esikäsitteily, mädätysjäännöksen käsittely, rejektiveden käsittely, biokaasun käsittely ja hyödyntäminen, hygienisointi ja reaktorin syöttö, lämmitys ja sekoitus. Syötteen esikäsitteily-, mädätysjäännöksen ja biokaasun käsittely- ja hyödyntämisvaiheisiin liittyvät prosessimittaukset riippuvat luonnollisesti prosessityypistä ja hallintatavasta. Esikäsitteilyä on käsitelty luvussa 3, mädätysjäännöstä luvussa 6 ja biokaasua luvussa 7.

Biokaasureaktorin prosessihallintaan liittyviä yleisiä on-line-mittauksia ovat syöttömäärän mittaaminen (virtausmittaus tai punnitus), reaktorin täyttilavuus (pinnankorkeus), reaktorilämpötila, pH, biokaasun tuottomäärä (virtaus) ja sen metaanipitoisuus. Biokaasun tarkempi koostumusanalyysi tehdään useimmiten kaasunäytteenoton (esim. pussinäyte) kautta kaasuanalyysiaattorilla.

#### **Laboratorioanalyysit:**

On-line-mittausten lisäksi prosessiseurantaa tehdään myös näytteenottojen ja näytteiden laboratorioanalyysien avulla. Näytteenotto on tärkeää tehdä oikein ja aina vastaavasti, edustavien näytteiden saamiseksi. Sekoituksella ja hyvillä virtausolosuhteilla varmistetaan, että näyte on homogeenista.

Keskeisiä näytteenottojen kautta seurattavia prosessiparametrejä ovat reaktorinäytteen pH, VFA- ja alkaliniteetti, ammoniakki, liukoinen COD, TS ja VS.

Kuten edellä luvussa 4.2.1 on tarkemmin kuvattu, hyvin puskuroidussa systeemissä pH-arvon seuranta on liian hidas tapa reagoida prosessihäiriöihin. Tarvitaan alkaliniteetti- ja VFA (haihtuvat rasvahapot)-mittauksia. Nämä, kuten muutkin em. laboratorioanalysoinnit ovat tärkeitä etenkin prosessin muutostilanteissa, kuten syöte- ja kuormitusmuutoksissa sekä prosessin ylösajovaiheessa.

Alkaliniteetti ja VFA-pitoisuudet voidaan määrittää titrausmenetelmällä, jolloin tuloksena saadaan kokonais-VFA-arvo. Jos halutaan tietää yksittäisten VFA-yhdisteiden (asettaatti, propionaatti jne.) pitoisuuksia ja osuuksia, voidaan tehdä tarkempi kaasu- tai nestekromatografinen (GC tai HPLC) määrittäminen. Liukoinen COD ( $COD_{sol}$ ) kuvaa kaikkea suodatetussa näytteessä liuenneessa muodossa olevaa orgaanista ainesta. Tähän kuuluvat mm. kaikki VFA-yhdisteet. Näin ollen näiden arvojen vaihtelut ovatkin yleensä suoraan riippuvaisia toisistaan.  $COD_{sol}$  määrittäystä varten näyte suodatetaan ja suodoksesta tehdään tavanomainen COD-määrittäminen, yleisesti pikamenetelmällä (esim. Hach-Lange). Myös ammoniakkimäärittäminen voidaan tehdä pikamenetelmällä, mutta myös perinteisellä työläämmällä vesihöyrytitrausmenetelmällä (vrt. Kjeldahl-tyyppimäärittäminen). Tuloksena saadaan kokonaisammoniakki ( $NH_4^+$  ja  $NH_3$ ) pitoisuus, ammoniumina. Kuten luvussa 4.2.4 on esitetty, näiden inhibitoraja-arvot ovat

hyvin erilaisia, ja on tärkeä tietää erikseen myös  $\text{NH}_3$ -pitoisuus. Tämä voidaan selvittää laskennallisesti yhtälön 4.2 avulla.

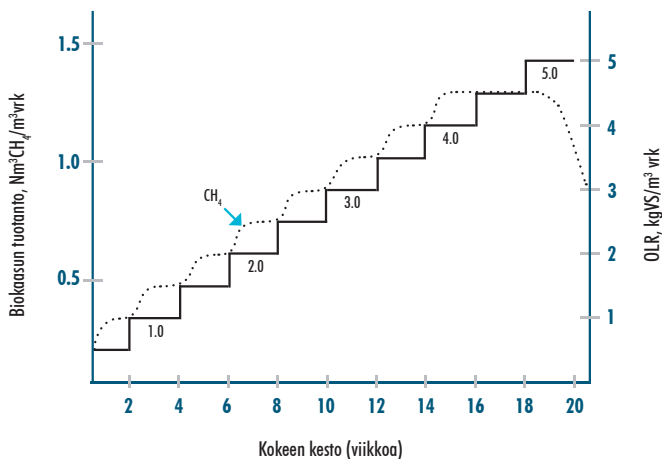
$$\text{NH}_3 \text{ (g L}^{-1}\text{)} = \text{NH}_4^+ \text{-N (g L}^{-1}\text{)} / (1 + 10^{(\text{pKa} - \text{pH})}) \quad \text{Y4.2}$$

$\text{pKa} = 0,09018 + 2729,92 / (T + 273,15)$ , jossa  
 $\text{pKa}$  = ammoniumin dissosiaatiovakio  
 $T$  ja  $\text{pH}$  ovat tapauskohtaiset lämpötila ( $^{\circ}\text{C}$ ) ja  $\text{pH}$ -arvot

Vastaavasti kuin syötteistä, myös reaktorinäytteistä ja mädätysjäännöksestä mitataan kuiva-aine (TS) ja orgaanisen aineen (VS) pitoisuuksia. Näiden mittausta on kuvattu edellä syötteiden valinta -kohdassa (luku 2.1.1).

#### 4.3.5 Reaktorin käynnistys ja häiriötilanteiden hallinta

Biokaasuprosessin käynnistäminen vaatii tarkkaa prosessiseurantaa ja hallintaa. Käynnistysvaihe, stabiilin prosessitilanteen saavuttamiseksi, voi kestää useita kuukausia, lyhimmilläänkin 2–3 kk. Pituuteen vaikuttaa mm. alkuympäri, sen sopivuus ko. syötteelle, ja ylösajosuunnitelma – miten nopeasti kuormitusta nostetaan tavoitekuormitustasoon. Suositeltavaa on lähteä lisäämään kuormitusta varovasti, alkaen tasosta  $0,5 \text{ kgVS (m}^3\text{vrk)}^{-1}$  ja nostaen kuormitusta aina  $0,5 \text{ kgVS (m}^3\text{vrk)}^{-1}$  noin 2 viikon välein (ks. kuva 4.11), kunnes biokaasutuotto ei enää lisäännä kuormitusta vastaavasti. Ennen kuormituslisäystä varmistetaan, että kuormitustason nostaminen aiheuttama VFA:n nousu on laskenut vakiotasolle ja prosessi osoittaa sen perusteella olevan adaptoitunut uuteen kuormitustasoon. Prosessin tavoitekuormitustaso on yleensä etukäteen määritetty laboratoriotason reaktorikokeilla.



Kuvio 4.11 Jatkuvatoinen biokaasureaktorin kuormitustason nosto ylösajovaiheessa. Kuormitusarvot ( $\text{kgVS(m}^3\text{vrk)}^{-1}$ ) oikealla ja päivittäinen  $\text{CH}_4$ -tuotto ( $\text{Nm}^3(\text{m}^3\text{vrk)}^{-1}$ ) vasemmalla. Kuvio mukaeltu lähteestä Wellinger, Murphy ja Baxter, 2013.

Hyvällä prosessihallinnalla pyritään välttämään häiriötilanteita. Tärkeitä toiminnallisia tekijöitä ovat

- ✓ vakiosyöttö, laatu ja kuormitus
- ✓ syötteen laadullinen seuranta: TS, VS, C/N, inhiboivat tekijät
- ✓ syötteen homogeenisyys ja pieni partikkelikoko
- ✓ vakio prosessilämpötila
- ✓ hyvä sekoitus (sekä syötesäiliö että CSTR-reaktori)
- ✓ prosessin monitorointi: T, pH, alkaliniteetti, VFA, ammoniakki, kaasumäärä ja koostumus

Häiriötilanteissa tärkeää on selvittää syitä ja tiedostaa korjaavia toimenpiteitä. Näitä on kuvattu seuraavassa. On kuitenkin hyvä muistaa, että biokaasuprosessit ovat yksilöllisiä ja reagoivat muutoksiin eri tavoin, eli yhtä yleispätevää ohjetta häiriötilanteiden välttämiseksi ja korjaamiseksi on vaikea antaa. Jos häiriötilanne on vakava, ja jatkuu ensimmäisistä, helpoista korjaavista toimenpiteistä huolimatta, niin ratkaisuna voi olla reaktorisäilyksen korvaaminen tai laimentaminen. Poistetaan reaktorisäilystä ja lisätään vettä tai uutta ympäriä sopivasta toimivasta biokaasureaktorista.

#### **Kohonneet VFA-pitoisuudet**

Edellä luvuissa 4.1.2 ja 4.1.3 on esitetty, miten haihtuvia rasvahappoja (VFA) aina väistämättä syntyy anaerobisessa hajoamisprosessissa, ja miten ne edelleen reagoivat mm. vedyksi ja metaaniksi. Tässä kohtaa hajoamisketjua on tärkeää hallita vetypitoisuutta, sillä liika pitoisuus estää VFA:n hajoamista (ks. Kuvio 4.3). Prosessin metanogeeniaktiivisuus on oltava riittävä kuluttamaan vetyä samaa tahtia kuin sitä muodostuu. Näin ollen, kun metanogeeniaktiivisuus jostain syystä, esim. jonkun em. inhibioteikijän vaikutuksesta heikkenee, tämä näkyy ensimmäisenä kohonneina VFA- ja vetypitoisuuksina. Jos tarkastellaan tarkemmin VFA-koostumusta, niin herkimmin häiriöön reagoi propionaatti (kuvio 4.3). VFA-pitoisuus kohoaa myös, jos metanogeeniaktiivisuus ei liian kuormituksen takia riitä käsittelemään reaktoriin syötetyn orgaanisen aineen hajoamistuotteita. Tästä syystä VFA-pitoisuus on keskeinen prosessin stabiilisuutta kuvaava suure.

Tasapainoisessa hajoamisessa VFA-arvo asettuu kyseiselle prosessille tyypilliselle tasolle. Tärkeää onkin tiedostaa tämä normaali taso, jotta osaa reagoida siinä tapahtuviin muutoksiin. Tyypillisesti kokonais-VFA-pitoisuudet ovat muutama sata mg (litra)<sup>-1</sup>, ja voivat häiriötilanteessa nopeastikin nousta tuhansiin mg (litra)<sup>-1</sup> -arvoihin. Tällöin on tarpeen selvittää prosessihäiriön syy, ja ensimmäisenä toimenpiteenä rajoittaa syöttöä.

VFA on hyvä mittari reaktorin käynnistysvaiheessa ja yleensäkin muutostilanteissa. Syöttömäärän lisääminen, esim. ylösajossa, tyypillisesti nostaa VFA-pitoisuutta ja arvon laskiessa normaalitasolle prosessi on

sopeutunut uuteen kuormitustasoon. Prosessin on siis mahdollista palautua hetkellisesti kohonneista VFA-arvoista. Tärkeää tässä kohtaa on seurata pitoisuustasoa riittävän useasti, kuin myös näiden vaikutusta alkaliniteetti- ja pH-arvoihin.

Korkea VFA-pitoisuus voi alkaliniteetin eli puskurikyvyn heikkenemisen seurauksena johtaa lopulta pH-arvon alenemiseen, jopa alle metanogeenien toiminta-alueen. pH-arvo reagoi siis prosessihäiriöön hitaammin, mutta pH-arvon lasku voi lopulta johtaa täydelliseen prosessin ja metaanituoton tyrehtymiseen. Käytännössä prosessin stabiilisuutta voidaankin arvioida VFA/alkaliniteetti-suhteella:

< 0,3	Stabiili prosessi
0,3 – 0,5	Vähäinen epästabiilius
> 0,5	Merkittävä epästabiilius

pH-arvon laskiessa ja metanogeenitoiminnan häiriintyessä, asidogeenit kuitenkin jatkavat toimintaa aina pH-arvoihin 4,5–5 saakka, tuottaen lisää VFA-yhdisteitä. pH-arvon lasku vaikuttaa edelleen myös VFA-yhdisteiden esiintymismuotoon: alle pH-arvossa 6 VFA-yhdisteiden ionisoitumattomat muodot alkavat hallita tasapainoa (esim. asetaatti-ioni vs. etikkahappo,  $pK_a$ -arvo 4,8). Kuten ammoniakkin yhteydessä todettiin (luku 4.2.4), ionisoitumaton muoto on soluille haitallinen ja näin VFA:n suora inhibiatiovaikutus alkaakin vasta alhaisissa pH-arvoissa. Suoran inhibiatiovaikutuksen estämistä merkittävämpää onkin hallita VFA-pitoisuutta tasapainoisen anaerobisen hajoamisen ylläpitämiseksi.

VFA-pitoisuuden nousuun voi olla useita syitä, kuten kuormitustaso- ja syötekoostumusmuutos sekä eri tekijöiden aiheuttama metanogeenien inhiboituminen, mitä on kuvattu edellä. Yleisesti sokeripitoiset syötteet muodostavat nopeasti rasvahappoja, proteiinipitoiset ovat riski ammoniakki-inhibition kautta ja rasvapitoiset pitkäketjuisten rasvahappojen (LCFA) muodostumisen kautta. Ensimmäisenä korjaavana tekijänä on yleensä rajoittaa syöttöä eli prosessikuormitusta. Myös syötekoostumuksen säätö voi olla eduksi.

#### pH:n lasku

Prosessin pH:n lasku on seurausta happojen kertymisestä prosessiin. Ensisijainen korjaava toimenpide onkin hallita happojen muodostumista. Nopea pH-arvon korjaus voidaan tehdä kemikaaleilla. Käytännössä biokaasulaitokset eivät lisää kemikaaleja reaktoriin jatkuvasti.

pH:n nostoon ja alkaliniteetin parantamiseen suositellaan natrium- ja kaliumbikarbonaattia ( $\text{NaHCO}_3$ ,  $\text{KHCO}_3$ ) tai karbonaattia ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{K}_2\text{CO}_3$ ). Niiden yliannostusriski on pienempi kuin kalkkia ( $\text{CaCO}_3$ ) käyttäessä. Tiettyjä annostelumääriä on vaikea sanoa etukäteen vaihtelevista

prosessiolosuhteista johtuen, ja suosituksena onkin lisätä vähitellen pienissä erissä ja seurata vaikutusta. Kemikaalilisäys voi johtaa myös ei-toivottuun painemuutokseen reaktorissa: paine laskee hiilidioksidin sitoutuessa kaasusta liuokseen kemikaalin vaikutuksesta.

pH-säätötarve voi olla myös toisinpäin eli pH:ta on säädettävä alemmaksi. Tähän on käytetty rautakloridia ja sitraattia.

#### **Kohonnut ammoniakki/ammonium**

Anaerobisessa hajoamisessa muodostuva ammonium, tasapainossa ammoniakkin kanssa voi muodostua ongelmaksi korkeatyyppipitoisilla syötteillä (alhainen C/N-suhde). Käytännössä paras tapa hallita tilannetta on säätää syötekoostumusta, jos mahdollista. Koska ammoniakki ( $\text{NH}_3$ )-muoto on inhiboivampi ja sen osuus kasvaa pH:n ja lämpötilan kasvaessa, alempi pH ja mesofiilinen prosessi termofiilisen sijaan on häiriötilanteissa suositeltavaa. Hyvä on myös muistaa, että prosessi voi ajan myötä sopeutua korkeampiin pitoisuuksiin.

#### **Kohonnut rikkivety**

Anaerobisessa hajoamisessa muodostuva rikkivety, tasapainossa vetysulfidin kanssa, voi muodostua ongelmaksi hyvin rikkipitoisilla syötteillä. Yksi keino hallita tilannetta on luonnollisesti vähentää kyseisen syötteen osuutta syötössä. Yleisesti käytössä oleva keino on myös lisätä syötteen mukana rautaioneja, esim.  $\text{FeCl}_2$  tai  $\text{FeCl}_3$  -muodossa. Nämä saostavat rikkiä rautasulfidina. Tämä ilmiö tapahtuu itsestään jätevedenpuhdistamojen lietemädättämöissä, joihin rautaa tulee syötelietteen mukana fosforinsaostuskemikaalina käytetyn ferrosulfaatin ansiosta. Tästä johtuen Suomen lietemädättämöjen biokaasun rikkivetypitoisuudet ovat alhaisella tasolla.

#### **Vaahtoaminen**

Vaahtoamista aiheuttavia syitä on monia. Syötteen korkea kuitu- ja ligniinipitoisuus sekä muoviaines voivat kertyä pintaan ja estää kaasun poistumisen. Näin pintakerros alkaa kohota kaasun vaikutuksesta. Syynä voi olla huono sekoitus. Rasvapitoiset syötteen on riski niiden sisältämien tai hajoamisessa muodostuvien vaahtoa muodostavien pinta-aktiivisten LCFA-yhdisteiden takia.

Akuutissa häiriötilanteessa vaahtoaamista voidaan hallita vaahdonestoaineilla. Tätä ei pidetä jatkuvana toimenpiteenä, vaan suositeltavaa on selvittää syyt ja vaikuttaa niihin. Ratkaisuna voi olla myös syöttökuormituksen jakaminen pienempiin eriin: useammin ja kerralla vähemmän.



## LÄHTEET JA LISÄTIETOA

- Al-Seadi Teodorita (Ed.), 2008. Biogas handbook. University of Southern Denmark. Esbjerg, Denmark. 126 p. *Linkki e-julkaisuun.*
- Bayr, S., Pakarinen, O., Korppoo, A., Liuksia, S., Väisänen, A., Kaparaju, P. ja Rintala, J. 2012. Effect of additives on process stability of mesophilic anaerobic monodigestion of pig slaughterhouse waste. *Bioresource Technology* 120, 106-113.
- Deublein, D. ja Steinhauser, A. 2008. Biogas from Waste and Renewable Resources. WILEYVCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. 443 p.
- Fuchs, W. ja Drogg, B. 2010. Technologiebewertung von Gärrestbehandlungs- und Verwertungskonzepten. BOKU – Universität für Bodenkultur Wien. Gröbnerdruck, Oberwart. 215 p.
- Korres, N.E., O’Kiely, P., Benzie, J.A. ja West, J.S. 2013. Bioenergy Production by Anaerobic Digestion. Using agricultural biomass and organic wastes. TJ International Ltd. Cornwall. UK. 442 p.
- Kymäläinen, M., Kannisto, L. ja Salmela, M. 2014. Lietemädättämöjen tehostaminen lietesakeutta nostamalla. *Vesitalous* 6/2014, 26-30. *Linkki e-julkaisuun.*
- Mata-Alvarez, J. 2003. Biomethanization of the Organic Fraction of Municipal Solid Wastes. IWA Publishing. TJ International Ltd. Cornwall. UK. 323 p.
- Schnürer, A. ja Jarvis, Å. 2009. Microbiological Handbook for Biogas Plants. Swedish Waste Management U2009:03. Swedish Gas Centre Report 207. 138 p. *Linkki e-julkaisuun.*
- Wellinger, A., Murphy, J. ja Baxter, D. (eds.) 2013. The biogas handbook. Science, production and applications. IEA Bioenergy. Woodhead Publishing Ltd. Philadelphia. USA. 508 p.

## 5. Biokaasuprosessit ja laitostaseet

Sari Luostarinen

Biokaasulaitoksessa on yleisesti ottaen tietyt pääprosessivaiheet mittakaavasta riippumatta. Laitoksen syötteille tehdään esikäsitteilyä ja esivarasointia, josta ne siirretään itse biokaasureaktoriin. Mädätysjäännös puolestaan kootaan jonkinlaiseen varastoon tai jälkikaasualtaaseen, mistä se kuljetetaan joko suoraan jatkokäyttöön tai varsinaiseen varastoon ennen jatkokäyttöä. Laitoksen raaka-ainepohja vaikuttaa valittuun laitostekniikkaan ja tekninen ratkaisu puolestaan siihen, millaisia rakenteita laitos vaatii.

Seuraavassa esitetään esimerkkejä prosessikokonaisuuksista toteutettuna eri tekniikoilla ja mm. erilaisissa maatilamittakaavoissa (tilakohtainen, tilojen yhteinen tai keskitetty laitos). Laitosten raaka-aineidien esikäsitteilyn ratkaisuja esitetään luvussa 3, tuotetun biokaasun käyttöön liittyviä tekijöitä luvussa 7 ja mädätysjäännöksen käyttöön liittyviä tekijöitä luvussa 6. Näin ollen tässä luvussa keskitytään itse biokaasuprosessiin.

Biokaasulaitokset muodostuvat erilaisista osaprosesseista, joihin on tarjolla erilaisia tekniikoita. Tekniikat eroavat toisistaan syöttötavan (panos tai jatkuva), prosessin kuiva-ainepitoisuuden (märkä tai kuiva) sekä vaiheisuuden (yleensä yksi tai kaksi) osalta. Valittu tekniikka riippuu näin ollen vahvasti tarjolla olevien syötteiden ominaisuuksista (mm. kuiva-ainepitoisuus). Prosessia valittaessa on syytä kiinnittää huomiota lisäksi myös laitoksen energiatuottotavoitteisiin ja mädätysjäännöksen haluttuihin ominaisuuksiin.

### 5.1 Märkä- ja kuivaprosessi

Biokaasulaitokset voivat toimia märkinä tai kuivina prosesseina. Olenainen ero tällöin on syöttömateriaalien kuiva-ainepitoisuus. Siinä missä märkäprosessit käyttävät pääasiassa lietemäisiä syöttömateriaaleja (TS maksimi n. 15 %), kuivaprosesseissa syöttömateriaalit ovat prosessin yleisnimityksen mukaisesti kuivia ja kasalla pysyviä (TS n. 20–40 %).

Märkäprosesseista jatkuvatoiminen, täyssekoitteinen reaktori on yleisin (CSTR = completely/continuously stirred tank reactor). Sen syöttö-

materiaalien kuiva-ainepitoisuus (TS) on yleensä alle 15 %, mikä mahdollistaa niiden pumppaamisen reaktoriin sisään ja sieltä pois sekä reaktorimassan tehokkaan mekaanisen sekoittamisen. Prosessiin voidaan lisätä myös kuivia syöttömateriaaleja erillisellä syöttölaitteella tai sekoittamalla kuiva materiaali lietemäisen joukkoon ennen syöttöä. Kuitenkin reaktorin sisällä olevan massan TS on pysyttävä alle 15 %:n sekoituksen ja poiston mahdollistamiseksi. Märkäprosessin voikin saada aikaan myös laimentamalla kuivaa syöttömateriaalia jollain saatavilla olevalla nesteellä, kuten esimerkiksi mädätysjäännöksestä erotetulla nestejakeella tai siitä puhdistetulla prosessivedellä. Tämä ei ole todennäköisesti kannattavaa pienessä mittakaavassa, sillä prosessin monimutkaisuudessa myös sen investointikustannus ja työmäärä kasvaa. Märkäprosessi toimii kaikissa mittakaavoissa ja sitä pidetään varsin kypsänä teknologiana (Kuvat 5.1 ja 5.2).

Kuivaprosesseja on sekä jatkuvatoimisia että panostoimisia (Kuvat 5.3, 5.4 ja 5.5). Olennaista on, että prosessit operoidaan yleisesti kuiva-ainepitoisuuksissa 20–40 %. Kuivaprosessien etuna pidetään pienempää reaktoritilavuutta per tuoretonni syöttömateriaalia. Toisaalta niiden tekninen hallinta on osoittautunut märkäprosesseja haastavammaksi eivätkä ne ole toistaiseksi yleistyneet. Kehitystyötä kuitenkin tehdään kaiken aikaa. Erityisen haastavana on pidetty kuivien massojen sekoitusta ja täten prosessiolosuhteiden sekä mikrobien ja käsiteltävän massan kontaktin varmistamista. Myös massojen siirrossa on ollut haasteita. Siirtoihin käytetään yleensä erilaisia hihnoja ja ruuveja. Myös biokaasun vapautuminen kuivasta massasta voi olla haastavampaa varmistaa.

## 5.2 Jatkuva- ja panostoiminen prosessi

Märkäprosessit toimivat yleensä aina jatkuvatoimisinä, kuten yllä todettiin. Kuivaprosessit voidaan toteuttaa sekä panos- että jatkuvatoimisena. Jatkuvatoinisuus tarkoittaa säännöllistä syöttöä ja poistoa tietyin väliajoin sekä täten jatkuvaa, mahdollisimman tasaista biokaasutuottoa. Panosprosessilla tarkoitetaan, että reaktori täytetään, suljetaan, jätetään hajoamaan haluttu aika ja tyhjennetään. Biokaasua muodostuu hajoamisen ajan vähitellen lisääntyen ja muuttuen CO<sub>2</sub>-pitoisemmasta kaasusta CH<sub>4</sub>-pitoisemmaksi, ja loppua kohden määrällisesti vähentyen.

### Jatkuvatoiminen märkäprosessi

Jatkuvatoimisen märkäprosessin reaktori on yleensä lieriönmuotoinen (eli sylinterimäinen) ja sen sisältöä sekoitetaan mekaanisesti lapasekoittimilla tai vastaavilla. Myös kaasusekoitus on mahdollinen. Tällöin laitoksen tuottamaa biokaasua hyödynnetään puhaltamalla se reaktorin pohjaan asennettujen venttiilien kautta, jolloin reaktorin sisällä oleva massa sekoittuu. Sekoituksen tehtävänä on pitää reaktorin sisältämä

massa tasalaatuisena, varmistaa sen tasainen lämpötila sekä hyvä kontakti käsiteltävän syöttömateriaalin ja mikrobiston välillä, ja vapauttaa muodostuva biokaasu reaktorin yläosan kaasutilaan. Vain tällöin voidaan olla varmoja, että syöttömateriaalit myös hajoavat halutusti.

Reaktorin lämpötila pidetään halutulla tasolla yleensä hyödyntämällä laitoksen itse tuottamaa lämpöenergiaa. Lämpö voidaan siirtää reaktoriin kierrättämällä lämmitettyä vettä reaktorin vaipassa tai erillisissä lämmitysputkissa reaktorin seinämällä. Lämpöä voidaan myös kierrättää laitoksessa ottamalla mädätysjäännöksen lämpöä talteen lämmönvaihdinten avulla ja ohjaamalla se takaisin syötön ja/tai reaktorin lämmitykseen. Vastaavasti lämpöä voidaan ottaa talteen ja käyttää tehokkaammin hygienisoinnin tai muun lämpöä tarvitsevan esikäsitteilyn yhteydessä.

Reaktori syötetään ja mädätysjäännös poistetaan täysin jatkuvatoimisesti tai tietyin säännöllisin väliajoin. Lietemäisten syöttömateriaalien syöttö tapahtuu yleensä esi- tai vastaanottosäiliöstä pumpaten. Kuiville syöttömateriaaleille on joko oma syöttölaitteensa tai ne sekoitetaan lietemäisiin jo ennen pumppausta reaktoriin. Erillinen syöttölaite voi olla esimerkiksi ruuvi, joka puskee kuivan materiaalin suoraan reaktorin sisältämään massaan (ks. luku 3). Syöttöjen yhteydessä mädätysjäännöstä poistuu reaktorista joko painovoimaisesti tai pumppaamalla. Näin reaktorissa olevan massan tilavuus pysyy vakiona.

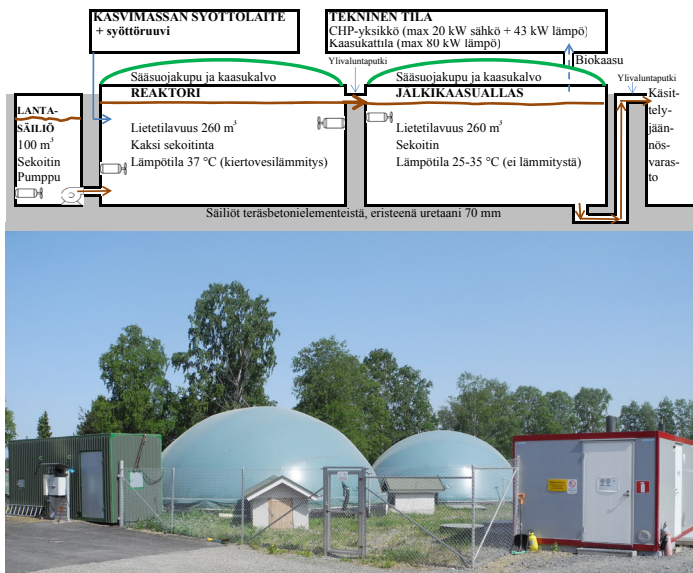
Jatkuvatoimisen märkäprosessin orgaaninen kuormitus ja viipymä riippuvat syöttömateriaalin hajoamisnopeudesta. Lantaa käsittelevissä reaktoreissa orgaaninen kuormitus on yleensä  $2 - 3 \text{ kgVS (m}^3\text{vrk)}^{-1}$  ja syöttömateriaalin keskimääräinen viipymä reaktorissa 20 – 30 vrk. Kasvireaktoreissa kuormitus on samaa luokkaa tai suurempi ja viipymä usein 30 vrk tai yli. Viipymää voidaan pidentää jälkikaasualtaan avulla (ks. jäljempänä). Suurissa keskitettyissä biokaasulaitoksissa viipymä on tyypillisesti vain n. 20 vrk, mikäli pääosa laitoksen syöttömateriaalista on helposti hajoavaa ja massamäärät suuria, kuten tyypillisesti biojätteitä ja puhdistamolietettä käsittelevissä biokaasulaitoksissa. Reaktorin kuormituksesta ja viipymästä yleisesti on kerrottu tarkemmin luvussa 4.3.

Jatkuvan sekoituksen myötä juuri syötetty materiaali ja reaktorissa kauemmin viipynyt materiaali sekoittuvat, jolloin syntyy väistämättä hieman oikovirtausta, ts. myös keskimääräistä viipymää lyhyemmän aikaa reaktorissa ollutta materiaalia poistuu prosessista. Tämä on syytä huomioida laitoksen mitoituksessa ja riittävässä viipymässä. Vaikka reaktorin tilavuus pyritään minimoimaan, liian pieni reaktori ja siten liian lyhyt viipymä ei tehosta laitoksen toimintaa. Päinvastoin syöttömateriaalit eivät ehdi hajota riittävästi, jolloin menetetään biokaasupotentiaalia, tuotetaan huonompilaatuista mädätysjäännöstä ja jäännöksen varastoinnin päästöriskit kasvavat (erityisesti metaanipäästöt).

Jatkuvatoimisen märkäprosessin mädätysjäännös on lietemäinen. Se voidaan hyödyntää sellaisenaan, separoida hyödynnettäväksi erillisinä kiiva- ja nestejakeina tai jatkojalostaa uusiksi tuotteiksi. Tästä kerrotaan tarkemmin luvussa 6.



Kuva 5.1 Energiakasveja käsittelevä märkäprosessi (Laupheim, Saksa). Kuva: Sari Luostarinen



Kuva 5.2 Luonnonvarakeskuksen Maaningan toimipisteen maatilakohtainen biokaasulaitos. Kuva: Ville Pyykkönen

## Jatkuvatoiminen kuiva-prosessi

Jatkuvatoiminen kuivaprosessi perustuu yleensä tulppavirtaukseen, jolloin syöttö tapahtuu sylinterimäisen, vaakatasossa makaavan reaktorin (Kuva 5.3) toisesta päästä, massaa siirretään sylinterin sisällä ja mädätysjäännös puretaan toisesta päästä. Kuivaprosessin mitoituksessa tulee huomioida, että syöttöön on lisättävä merkittävässä määrin jo kertaalleen prosessin läpimennyt mädätysjäännöstä mikrobiympiksi ja/tai kierrättää prosessista suotautuvaa nestettä tai jäännöksestä erotettua nestejakeita, minkä avulla kierrätetään myös hajottamiseen tarvittavaa mikrobistoa ja säädetään prosessin kuiva-ainepitoisuutta. Reaktorin nesteiden kierrättäminen on optimoitava, jottei mm. prosessin typpipitoisuus nouse inhiboivalle tasolle. Jatkuvatoimisia kuivaprosesseja on pääasiassa käytössä yhdyskuntien biojätteiden ja vastaavien materiaalien käsittelyssä suurina laitoksina. Kehitystyötä tehdään kuitenkin eri puolilla maailmaa ja uusia laitosratkaisuja on tullut markkinoille.

Jatkuvatoimisen kuivaprosessin mädätysjäännös voi olla sellaisenaan lannoitekäyttöön soveltumatonta, jos se ei sovellu markkinoilla oleville levityslaitteille. Mädätysjäännös voi olla lietemäistä eikä pysy kasalla. Näin olleen nykyiset lietelannan tai kuivalannan levityslaitteet eivät sille sovi. Jäännös voi myös olla tahmaista, sekoitusvaikeuksien vuoksi epätasalaatuista, vaihtelevasti hajonnutta sekä hankalasti varastoitavaa. Näin ollen sen jatkokäsittely on välttämätöntä. Joko se on mekaanisesti separoitava kuiva- ja nestejakeeseen, mistä ei ole juuri kokemuksia, tai se on sekoitettava tukiaineeseen ja jälkikompostoitava, jolloin lopputuote on kompostia eikä vastaa enää biokaasuprosessin jäännöstä ominaisuuksiltaan. Kompostoinnissa hukataan helposti arvokasta tyypeä. Yksi merkittävä kehityskohde jatkuvatoimisille kuivaprosesseille onkin mädätysjäännöksen käytökelpoisuuden parantaminen toimivin ja edullisin ratkaisuin.



Kuva 5.3

Tulppavirtausreaktori (Thöni, Itävalta). Kuva: Teija Paavola

### Panostoiminen kuivaprosessi

Panosprosessit ovat käytössä kuivien materiaalien käsittelyssä (Kuvat 5.4 ja 5.5). Panosreaktori täytetään kerralla ja panos jätetään hajoamaan halutuksi ajaksi kunnes reaktori tyhjenetään. Vastaavasti kuin jatkuva-toimisessa kuivamädätyksessä myös panosprosessissa tuoreeseen syötötmateriaaliin sekoitetaan prosessin aiempaa mädätysjäännöstä ympiksi. Prosessissa voidaan myös kierrättää käsiteltävän massan läpi suotautuvaa nestettä sumuttamalla sitä panosmassan päälle, jolloin kierrätetään mikrobistoa ja säädetään prosessin kosteustasapainoa, sekä säädelään hajoamista ja kaasuntuottoa. Panostoimisten kuivaprosessien kaasuntuottoa voidaan tasata käyttämällä useita panosreaktoreita sarjassa, ts. panoksia on aina sekä täytössä, kaasuntuotossa että tyhjennettävänä.

Panosprosesseja on aiemmin pidetty tehottomina eivätkä ne ole toistaiseksi yleistyneet. Hajoamisprosessia on märkäprosessia vaikeampaa hallita ja mädätysjäännös on toisinaan heikosti hajonnutta ja täten epätasalaatuista. Jatkokäsittelyksi suositellaankin yleensä kompostointia, mikä pääasiassa toteutetaan aumassa. Aumakompostoinnilla hukataan tyypillisesti kuitenkin merkittävä osa jäännöksen tpestä ja aiheutetaan haitallisia ammoniakkipäästöjä.



Kuva 5.4 Autotallimallin panosprosessi (Münchenin eläintarha, Saksa). Kuva: Sari Luostarinen



Kuva 5.5 Panostoiminen kuivareaktori esimerkiksi oljelle ja suojavyöhykenurmelle Laukaan Lep-pävedellä. Hajoamisessa muodostuvaa nestettä kerätään talteen (pyöreä allas) ja kierrä-tetään prosessissa. Kuva: Juha Salimäki, Metener Oy.

Panosprosessin yhtenä sovelluksena on suotopetireaktori (leach bed), jossa kuivaa syöttömateriaalia (esimerkiksi kasvia) huuhdellaan nesteel-lä, johon hajoamistuotteet liukenevat. Nestettä voidaan kierrättää suoto-pedissä sellaisenaan ja tavoitella prosessin muuttamista suoraan biokaasua tuottavaksi. Se voidaan myös johtaa erilliseen reaktoriin, jossa bio-kaasu muodostuu. Erillinen biokaasureaktori voi olla esimerkiksi anaero-binen lietepatjareaktori (esim. UASB = anaerobinen ylösvirtauslietepatja tai IC = sisäisen kierron reaktori) tai anaerobinen suodin, jotka ovat tyy-pillisiä jäteveden anaerobiseen käsittelyyn käytettäviä reaktoriratkaisuja (Ks. luku 1.2). Nesteen viipymä reaktorissa on lyhyt, yleensä alle 1–2 vrk, jopa muutamia tunteja. Myös prosessien orgaaninen kuormitus on korkea ( $5–20 \text{ kgCOD (m}^3\text{vrk)}^{-1}$ ).

### 5.3 Yksi- ja kaksivaiheinen prosessi

Useimmat biokaasulaitokset ovat yksivaiheisia tarkoittaen, että laitokses-sa on yksi biokaasureaktori, jossa pääosa raaka-aineiden hajoamisesta ja biokaasutuotosta tapahtuu. On makuasia, haluaako mahdollisen jälkikaasualtaan laskea laitoksen toiseksi vaiheeksi vai pitääkö sitä vain laitoksen olennaisena osana. Jälkikaasuallas on kuitenkin suositeltava jokaiselle jat-kuvatoimiselle laitokselle, jotta reaktorin jäännöksestä edelleen muodostuva biokaasu, ts. jälkikaasu, kerätään hallitusti talteen ja hyödynnetään yhdessä reaktorikaasun kanssa. Mikäli jäännös vain johdetaan avoimeen altaaseen reaktorin jälkeen, se tuottaa vielä metaania, joka voi pilata lai-toksen positiiviset ympäristövaikutukset, ja näin hukataan myös metaani-energiaa. Jälkikaasualtaan suositeltu viipymä riippuu laitoksen mittakaa-vasta ja reaktorin viipymästä. Pienemmissä laitoksissa viipymä kannattaa



maksimoida. Suurissa laitoksissa jälkikaasualtaan viipymä jää suurien massamäärien vuoksi yleensä lyhyemmäksi. Periaatteessa vastaavan hajoamisen voi saavuttaa myös maksimoimalla viipymän itse reaktorissa, mutta tämä tarkoittaa suurta lämmitettyä reaktoria, mikä ei yleensä ole kannattavaa.

Varsinaisessa kaksivaiheisessa prosessissa kyse on yleensä erillisistä hydrolyysivaiheen sekä metaanituottovaiheen reaktoreista. Tavoite on optimoida hajoamisen eri vaiheet siten, että hydrolyysi ja asidogeneesi haihtuviksi rasvahapoiksi tapahtuu erillisessä reaktorissa niille optimaalisissa olosuhteissa, kun taas itse metanogeneesi optimoidaan erikseen. Prosessitekniikan kannalta tämä tarkoittaa siis kahta reaktoria sarjassa ja hieman toisistaan poikkeavasti operoituna. Tämä tarkoittaa myös lisää automatiikkaa ja massojen siirtoja sekä entistä tarkempaa operointi- ja prosessiosaamista onnistumisen takaamiseksi. Edellä mainittu suotopetireaktori on esimerkki kaksivaiheisesta prosessista. Kaksivaiheiset laitokset eivät ole yleistyneet, sillä yksivaiheinen on helpommin hallittava ja kustannuksiltaan edullisempi. Kaksivaiheisuudesta mahdollisesti saatavat edut syöttömateriaalien hajoamisessa ja täten biokaasutuotossa eivät ole olleet riittävät menetelmän yleistymiseksi.

#### 5.4 Biokaasulaitoksen tasetarkastelua

Biokaasulaitokset voidaan toteuttaa lukuisissa erilaisissa mittakaavoissa. Monissa kehittyvissä maissa talokohtaiset pienlaitokset ovat yleisiä. Niissä kotitalouden jätevirrat käymäläjätteestä pienviljelyn ja kotieläinten jätteisiin johdetaan pieneen reaktoriin, jonka tuottamalla biokaasulla saadaan kotitalouden tarvitsema energia ruuanvalmistukseen ja valaistukseen. Mädätysjäännös hyödynnetään pienviljelyssä.

Länsimaisissa yhteiskunnissa pienin laitoskoko on yleensä maatilakohmainen biokaasulaitos. Tällöin biokaasua tuotetaan pääasiassa oman tilan lannoista ja kasvintuotannon jätteistä ja sivuvirroista. Biokaasuenergia ja mädätysjäännös hyödynnetään tyypillisesti tilan omassa toiminnassa. Mittakaavan kasvun tuomien taloudellisten hyötyjen ja laitostoinnin työmäärän jakamiseksi maatilat ovat perustaneet yhteisiä biokaasulaitoksia, joihin voidaan ohjata useamman tilan lannat ja kasvintuotannon jätteet ja sivuvirrat.

Suuren mittakaavan keskitetyistä laitoksista puhutaan yleensä silloin, kun laitostoimija on erillinen yhtiö, jolla ei välttämättä ole kytköstä laitoksessa käsiteltävien kaikkien raaka-aineiden muodostumiseen. Sen sijaan laitos ottaa erilaisia raaka-aineita porttimaksullisina vastaan, myy niistä tuotetun energian ja hallitsee mädätysjäännöksen jatkokäyttöä markkinoimalla sitä sellaisenaan tai jatkojalostettuna eteenpäin loppukäyttäjille.

### 5.4.1 Esimerkki maatilatason biokaasulaitoksen energiataseesta

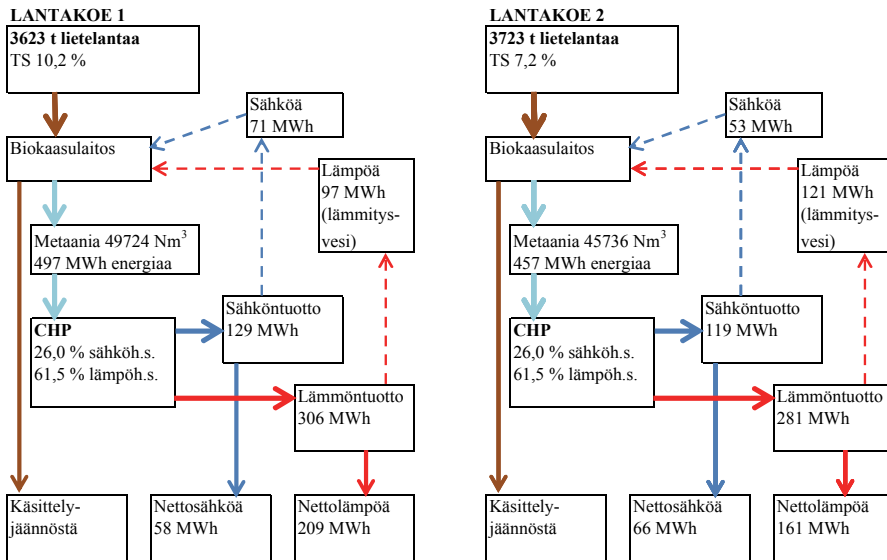
Tilojen biokaasulaitokset käsittelevät yleensä tilan omia raaka-aineita, kuten kotieläinten lantaa ja kasvintuotannon jätteitä ja sivuvirtoja. Tilat voivat myös ottaa vastaan raaka-aineita tilan ulkopuolelta, mutta tällöin on syytä pohtia ulkopuolisten raaka-aineiden vaikutuksia mm. laitoksen toimintaan, hygieniaan, rikkakasveihin, lupaprosesseihin ja tilan ravinnetaseeseen. Tilan ulkopuoliset raaka-aineet tuovat tilan ravinnekiertoon uusia ravinteita, joiden tulisi olla käytettävissä tilan omilla pelloilla tai luovutettavissa muiden tilojen käyttöön. Ne voivat vaatia hygienisointia tai muuta validoitua käsittelyä tai niiden mukana voi tilalle tulla rikkakasvinsiemeniä tai kasvitauteja. Laitoksessa tulee myös olla niiden käsittelyyn riittävä kapasiteetti ja sopiva teknologia. Myös lisäenergia täytyy pystyä hyödyntämään.

Maatilojen biokaasulaitokset ovat yleensä tekniikaltaan suhteellisen yksinkertaisia, jotta ne ovat helppoja ja luotettavia operoidea ja investointikustannukseltaan kohtuullisia. Pääosa laitoksista perustuu perinteisiin ja koeteltuihin märkäprosesseihin, mutta myös kuivaprosesseja kehitetään aiempia tehokkaammiksi ja tilakohtaisiinkin laitoksiin soveltuviksi.

Tilakohtaisen biokaasulaitoksen operoinnissa kannattaa huomioida laitoksen energiatase ja maksimoida laitoksesta tilan käyttöön tulevan energian määrä. Käytännössä laitoksen omakäyttöön tarvittavan energian määrä pyritään pitämään alhaisena. Eniten taloudellista hyötyä tuo yleensä biokaasulaitoksen sähkönkulutuksen minimointi, joka saavutetaan parhaiten sekoituksen minimoinnilla.

Esimerkkinä seuraavassa esitetään naudan lietelannan kahden erillisen käsittelykokeen energiataseet Luke Maaningan biokaasulaitoksella (Kuvio 5.1). Lannan kuiva-ainepitoisuudesta riippuen tuotettiin eri määrä energiaa. Toisaalta myöhemmissä kokeissa sekoitusta pienennettiin, jolloin laitoksen nettosähköntuotto parani. Pienellä säilörehulisällä laitoksen energiantuotto saatiin miltei kaksinkertaistumaan (tarkemmin ks. Luostari-nen ym. 2013).

Laitoksen energiataseen voi laskea huomioimalla syöttömateriaalien määrät ja niiden metaanituotot (esim. tuorepainoa tai orgaanisen aineen pitoisuutta kohti) tai laitoksella mitattu metaanintuotto. Metaanin energiasisältö on  $10 \text{ kWh m}^{-3}$ . Energiatuottolaskennassa tulee huomioida myös metaanin hyödyntämislaitteiston (esim. lämpökattila, CHP-yksikkö) hyötysuhde. (Biokaasun eri hyödyntämistapojen, lämmön- ja sähköntuotantolaitteiden, hyötysuhteita on käsitelty luvuissa 7.5 – 7.6). Laitoksen oma energiantarve vähennetään tuotettavasta bruttoenergiasta, jolloin päädytään laitoksen nettoenergiaan, joka on käytettävissä laitoksen ulkopuolella.



Kuvio 5.1 Luke Maaningan maatilakohtaisen biokaasulaitoksen energiatase kahden koeajon aikana pelkkää naudan lietelantaa käsiteltäessä (Luostarinen ym. 2013).

#### 5.4.2 Esimerkki biokaasulaitoksen massa- ja ravinnetaseesta

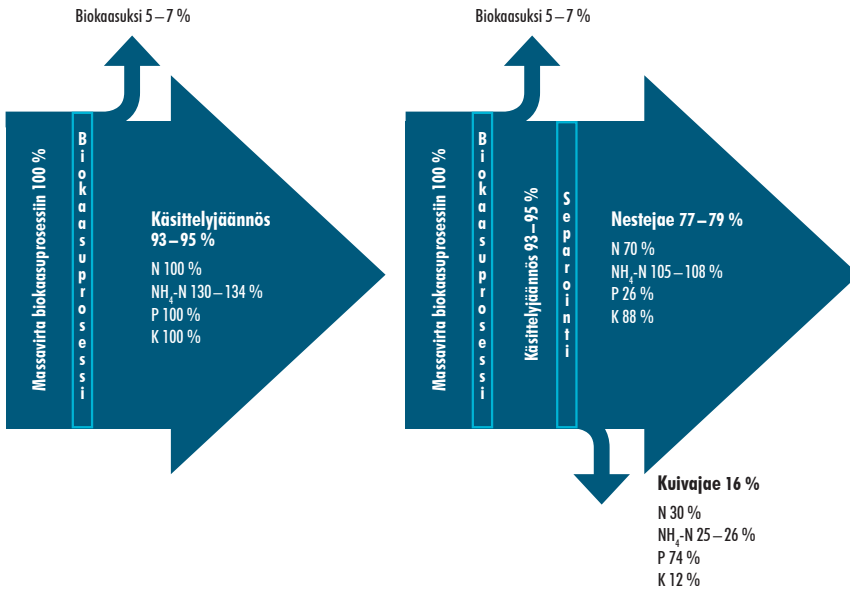
Biokaasulaitokseen syötettävien raaka-aineiden kuiva-aineesta mädätysjäännökseen päätyvä osuus vaihtelee merkittävästi raaka-aineesta riippuen. Tätä on kuvattu esimerkinomaisesti kuviossa 2.2 (ks. luku 2.1.1). Merkittävää kuitenkin on, että raaka-aineen ravinteet päätyvät pääosin mädätysjäännökseen.

Märkäprosessissa (TS alle 15 %) syötteestä suurin osa on vettä (yli 85 %). Näin ollen syötteen kokonaismassasta vain pieni osa päätyy biokaasuksi ja mädätysjäännöksen määrä on tyypillisesti yli 90 % alkuperäisestä syöttömäärästä. Ravinteita ja massoja päästään jakamaan eri jakeisiin vasta mädätysjäännöksen jatkoprosessoinnilla, josta kerrotaan jäljempänä, luvussa 6.

Kuviossa 5.2 on esitetty esimerkki sianlietelantapainotteisen syötteen märkäprosessoinnin massa- ja ravinnetaseesta, jos mädätysjäännös separoidaan kuiva- ja nestejakeeksi. Tarkempia tietoja on saatavissa Marttisen ym. (2015) raportista.

Massa- ja ravinnetaseita laadittaessa on huomioitava typen mineralisoinnista johtuva ammoniumtyypimäärän lisäys sekä orgaanisen aineen

muuntuminen biokaasuksi. Fosforin, kokonaistypen ja kaliumin arvioidaan säilyvän biokaasuprosessissa muuttumattomana, ts. syöttömateriaalien sisältämät P-, N- ja K-kokonaismäärät siirtyvät mädätysjäännökseen.



Kuvio 5.2. Tyypillinen märkäprosessoinnin massa- ja ravinnetase mädätysjäännöksen separoinnilla (oikea) ja ilman separointia (vasen). Raaka-aine: pääosin, yli 85 %, sian lietelantaa. (Marttinen ym. 2015).

## LÄHTEET JA LISÄTIETOA

- Luostarinen, S. (Ed.) 2013. National scenarios, best practices and recommendations for manure energy use in the Baltic Sea Region. 136 p. Baltic Forum for Innovative Technologies for Sustainable Manure Management. Knowledge Forum. *Linkki e-julkaisuun.*
- Luostarinen, S., Normak, A. ja Edström, M. 2011. Overview of biogas technology. Knowledge report, Baltic Manure, 47 p. *Linkki e-julkaisuun.*
- Luostarinen, S., Pyykkönen, V. ja Rintala, J. 2013. Biokaasuteknologiaa maataloilla – Osa 1 : Biokaasulaitoksen hankinta, käyttöönotto ja operointi – käytännön kokemuksia MTT:n maatilakohtaiselta biokaasulaitokselta. MTT Raportti 113: 96 s. *Linkki e-julkaisuun.*
- Luostarinen, S., Paavola T., Ervasti S., Sipilä I. ja Rintala J. 2011. Lannan ja muun eloperäisen materiaalin käsittelyteknologiat. MTT Raportti 27: 64 s. *Linkki e-julkaisuun.*

Marttinen, S., Tampio E., Sinkko T., Timonen K., Luostarinen S., Grönroos J. ja Manninen K. 2015. Biokaasulaitokset – syötteistä lopputuotteisiin. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 14/2015. Luonnonvarakeskus. 67 s.  
*Linkki e-julkaisuun.*

## 6. Mädätysjäännöksen käsittely ja hyödyntäminen

Teija Paavola (luvut 6.1 – 6.4) ja Petri Kapuinen (luvut 6.5 – 6.6)

Biokaasuprosessin eli mädätyksen lopputuotteena muodostuu biokaasun lisäksi aina mädätysjäännöstä. Märkäprosessoinnissa, joka on yleisin biokaasutuottoprosessi Suomessa, reaktorin kokonaismassasta on vettä vähintään 85 %. Tällöin mädätysjäännöstä muodostuu käytännössä karkeasti sama määrä kuin mitä biokaasureaktoriin on syötetty. Biokaasuprosessissa kokonaismassa ei siis merkittävässä määrin vähene, vaikka kuivaainetta muuntuukin biokaasuksi (ks. Kuvio 2.2, Luvussa 2.1.1). Hyvänä puolena on, että ravinteet säilyvät mädätysjäännöksessä, ja siitä on mahdollista valmistaa laadukkaita lannoitevalmisteita/kierrätysravinnetuotteita, joita perinteisesti hyödynnetään kasvintuotannossa. Hyödyntäminen myös teollisuussovelluksissa on alkanut.

Mädätyksessä massan pH tyypillisesti nousee, jolloin ammoniumtyypen haihtumispotentialiaali ammoniakkina nousee. Lannoitetuotteiden hyödyntämisessä onkin kiinnitettävä erityistä huomiota levitystekniikoihin mm. ammoniakkipäästöjen vähentämiseksi.

### 6.1 Mädätysjäännöksen yleiset ominaisuudet

Mädätysjäännös koostuu niistä raaka-aineista, joita biokaasulaitokseen on syötetty. Syötteen vesi säilyy vetenä, osa kuiva-aineen orgaanisesta aineksesta muuntuu reaktioiden kautta erilaisiksi yhdisteiksi sekä biokaasuksi, ja epäorgaaninen aines päättyy mädätysjäännökseen. Raaka-aineiden ominaisuuksien, kuten ravinnepitoisuuksien, biologisen hajoamisen ja mahdollisten haitta-aineiden, tunteminen onkin ensiarvoisen tärkeää mädätysjäännöksen ominaisuuksien, jatkoprosessoinnin ja mahdollisten käyttökohteiden arvioimiseksi ja ymmärtämiseksi. Lisäksi mädätysjäännöksen ominaisuuksiin vaikuttaa biokaasuprosessin olosuhteet, kuten lämpötila, orgaaninen kuormitus ja viipymä, sekä käytetty teknologia eli kuiva- vai märkäprosessi, täyssekoitteinen vai tulppavirtaus jne.

Yleisesti ottaen, mädätysjäännöksen kuiva-aine- ja orgaanisen aineen pitoisuus on alempi verrattuna laitoksen syöttömateriaaliin, koska osa ko. aineesta hajoaa biokaasuksi biokaasuprosessin aikana (ks. Kuvio 2.2). Mädätysjäännös on siis juoksevampaa ja tasalaatuisempaa kuin syöttö-

materiaali, mikä parantaa sen hyödynnettävyyttä mm. kasvinravinnepkäytössä. Biokaasuprosessi myös hygienisoi materiaaleja eli tuhoaa taudinaiheuttajia ja rikkakasvien siemeniä.

Mädätysjäätännös sisältää kaikki pää- ja hivenravinteet, kuten typen, fosforin, kaliumin, magnesiumin, jotka raaka-aineiden mukana biokaasuprosessiin on syötetty. Ravinteiden kokonaispitoisuus ei siis muutu prosessissa, mutta anaerobisen hajoamisen yhteydessä tapahtuu ammonifikaatiota (typen liukoistumista eli mineralisaatiota) eli osa raaka-aineiden orgaanisesta tuestä hajoaa ammoniumtypeksi ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ). Ammoniumtppi kuuluu ns. liukoiseen tyypeen. Se muuntuu maassa pääosin nitraatiksi. Kasvi ottaa maasta tyypeä sekä ammoniumtyyppinä että nitraattina. Nitraattityppi on liuenneena maavedessä, josta kasvi saa sitä jatkuvasti vedenoton yhteydessä. Toisaalta nitraattityppi liikkuu helposti maaperässä ja on siten herkkä huuhtoutumiselle. Ammoniumtppi taas voi sitoutua maapartikkeleihin, eikä ole siten niin herkkä huuhtoutumiselle. Biokaasuprosessi ja siinä tapahtuva typen mineralisaatio parantaa siis mädätysjäätännöksen arvoa kasvinravinnepkäytössä verrattuna syöttömateriaaliin. Mineralisaation määrä riippuu mm. raaka-aineista, prosessointilämpötilasta ja -teknologiasta sekä viipymästä, joten mitään yksiselitteistä arvoa sille ei voi antaa. Esimerkiksi naudan lannalla liukoisen typen määrä nousee mesofiilisessa biokaasuprosessissa n. 20 % ja termofiilisessa enemmän. Naudan lannalla liukoistuminen ei ole niin voimakasta, koska nautaeläimet ovat märehittäjiä, jolloin materiaali on jo kertaalleen yhden ammonifikoivan prosessin läpimennyt. Sian lannan tppi voi mineralisoitua naudan lantaa voimakkaammin. Vastaavasti kasvibiomassan typen mineralisaatio voi olla jopa 50–80 %.

Toisaalta biokaasuprosessi nostaa pH:ta, mikä lisää typen haihtumisriskiä. Mädätysjäätännöksen käsittelyyn, jatkoprosessointiin, varastointiin ja hyödyntämiseen onkin kiinnitettävä erityistä huomiota, ettei prosessin hyötyjä menetetä huonojen käytäntöjen vuoksi. Biokaasuprosessin on todettu vähentävän myös hajua aiheuttavia yhdisteitä yli 90 %.

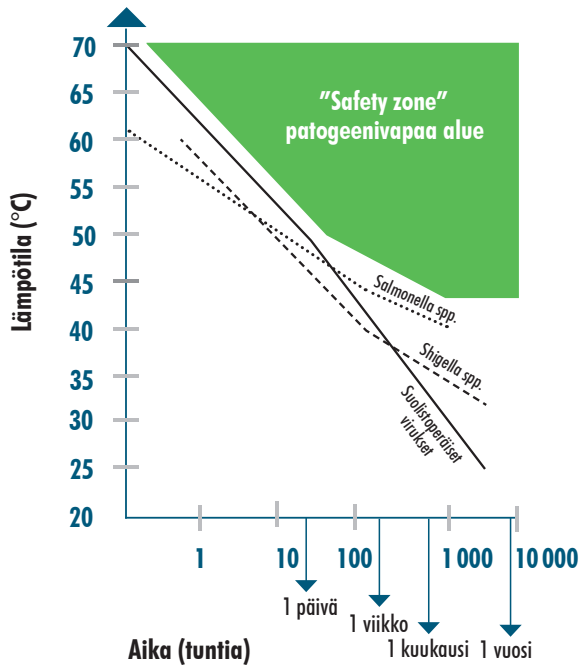
## 6.2 Riskit, hygienia ja haitta-aineet

Biokaasulaitoksen raaka-aineet voivat sisältää itse prosessia häiritsevien yhdisteiden lisäksi myös lopputuotteen hyödyntämiseen liittyviä riskejä, kuten kasvi- ja eläintauteja, haitallisia metalleja tai muita haitallisia yhdisteitä kuten orgaanisia haitta-aineita, lääkeaineita ja hormonijäämiä. Esimerkiksi eläimistä ihmisiin tarttuvia taudinaiheuttajia eli zoonooseja on käsittelemättömistä jätteistä tunnistettu yli 150 lajia. Tunnettuja tauteja aiheuttavia bakteerisukuja ovat mm. *Salmonella*, *Escherichia*, *Campylobacter*, *Clostridium* ja *Yersinia*. Näistä esimerkiksi *Salmonella* spp. voi säilyä kahdeksasta kuukaudesta jopa vuoteen maaperässä, johon on levitetty salmonellalla saastunutta lantaa (Marttinen ym. 2013).

Laitoksessa hyödynnettävät raaka-aineet on siis tunnettava ja mahdolliset riskit pystyttävä joko poistamaan prosessoinnin aikana tai ymmärrettävä niiden vaikutus lopputuotteen hyödynnettävyyteen eri käyttökohteissa.

Maatilamittakaavan biokaasulaitoksessa voidaan hyödyntää tilan omia lantoja ja kasvijätteitä ilman erillistä hygienisointia. Tällöin lopputuote katsotaan raakalannaksi ja se voidaan hyödyntää tilan omilla pelloilla. Tilakohtaiseksi toiminnaksi katsotaan myös tilojen yhteinen biokaasulaitos silloin, kun lopputuotteet hyödynnetään näiden tilojen pelloilla. Tilan ulkopuoliset raaka-aineet on hygienisoitava erillisessä hygienisointiyksikössä tai muuten varmistettava riittävästä hygienisoitumisesta, mikäli sivutuoteasetus niin edellyttää tai mikäli mädätysjäännöstä on tarkoitus luovuttaa/markkinoida tilan ulkopuolelle.

Hygienisointimiste riippuu erityisesti lämpötilasta ja -ajasta (Kuvio 6.1). Lämpötilan lisäksi hygienisointimiseen vaikuttavat mm. pH, käsittelymenetelmä (panos/jatkuva), patogeenilaji ja -määrä, sekä kilpailu ravinteista muiden mikrobien kanssa. Näin ollen kuviossa 6.1 esitetty patogeenien tuhoutuminen lämpötilan ja ajan funktiona hivenen poikkeaa riippuen mädätysjäännöksestä ja muista ympäristöolosuhteista. On myös huomioitava, että bakteeri-itiöt (esim. *Bacillus cereus* ja *Clostridium perfringens* itiöt) eivät tuhoudu vastaavissa olosuhteissa kuin itse bakteerit, eli ovat yleisesti selvästi lämpökestävämpiä.



Kuvio 6.1 Patogeenien tuhoutuminen lämpötilan ja ajan funktiona. Kuvio mukaeltu lähteestä Carington, 2001.



Termofiilinen biokaasuprosessi sellaisenaan on selvästi mesofiilista prosessia tehokkaampi hygienisoija. Erillisissä jätteitä käsittelevissä biokaasulaitoksissa hygieniariskit hallitaan useimmiten erillisellä hygienisointikäsitteilyllä, jossa materiaalit lämpökäsitellään hygienisointiyksikössä (pastorointiyksikössä) alle 12 mm palakoossa tunnin ajan vähintään 70 °C:n lämpötilassa. Hygienisointiyksikkö voi sijaita joko ennen tai jälkeen biokaasuprosessin. Hygienisointikäsitteilynä voi toimia myös jokin määtysjäätännöksen jatkokäsittelyprosesseista (ks. luku 6.2). Asianmukaisesti käsiteltäviä ja hygienisoituja biokaasulaitosten lopputuotteita voidaan pitää hygieenisyyden perusteella turvallisina orgaanisina lannoitevalmisteina ja maanparannusaineina.

Jotkin teollisuuden sivutuotteet tai orgaaniset jätteet voivat sisältää prosessikemikaalijäämiä tai haitallisia metalleja, jotka päätyvät biokaasulaitoksen lopputuotteisiin. Ne voivat myös häiritä biokaasuprosessin toimintaa. Teollisuusprosessi ja siinä käytettävät kemikaalit on siis selvitettävä ja raaka-aine analysoitava ennen vastaanottoa biokaasulaitokseen. Lannoitevalmistelainsäädännön edellyttämät haitallisten metallien pitoisuudet eivät saa lopputuotteissa ylittyä. Ajantasainen lannoitevalmisteiden käyttöä, valmistusta, markkinoille saattamista, tuontia ja vientiä koskeva lainsäädäntö löytyy Elintarviketurvallisuusviraston verkkosivuilta.

Yhdyskuntien jätevesilietteet sisältävät hyvin paljon erilaisia yhdisteitä, jotka ovat peräisin sekä teollisuudesta että kotitalouksista. Puhdistamolietteiden laatu on kuitenkin parantunut jatkuvasti. Esimerkiksi haitallisten metallien pitoisuudet ovat laskeneet murto-osaan siitä, mitä ne olivat 1970-luvulla. Käsitteilymenetelmiä on kehitetty voimakkaasti ja samalla myös jätevesien laatu on parantunut, kun haitta-aineet pyritään poistamaan jo jätevesien syntypaikoilla, viemäriin päätyvien sadevesien määrää on vähennetty sekä seuranta on tehostettu. Useimmiten jätevesiperäisissä määtysjäätännöksissä lähimpänä lainsäädännön raja-arvoja on kadmiumpitoisuus, mutta sekään harvemmin rajoittaa levitysmääriä.

Tällä hetkellä keskustelua aiheuttavat laaja kirjo erilaisia orgaanisia haitta-aineita ja lääkeaineita (Taulukko 6.1), jotka päätyvät yhteiskunnan toimintoista jätevedenpuhdistamoille ja edelleen vesistöihin. Haitalliset aineet päätyvät puhdistamoille teollisuuden ja kotitalouksien jätevesien, kaatopaikkavesien ja hulevesien mukana. Kotitalouksissa nämä aineet ovat peräisin mm. siivouksessa ja pyykinpesussa käytetyistä kemikaaleista, myös tekstiileistä ja vaikkapa muoviastioista irtoaa kemikaaleja (tarkemmin Marttinen ym. 2014). Kaatopaikkavedet voivat sisältää myös sellaisia aineita, joiden käyttö on nykyään jo kielletty. Hulevesiin päätyy ilmalaskeuman kautta maanpinnalle päätyvät yhdisteet, esim. liikenteestä peräisin olevat yhdisteet. Osa näistä jätevedenpuhdistamolle päätyvistä aineista päätyy puhdistamolietteen mukana myös biokaasulaitoksille ja edelleen lannoitevalmisteiden mukana ympäristöön. Myös yhdys-

kuntien biojätteet voivat sisältää mm. lääkeaineita, jos syntypaikkalajittelua ei ole tehty oikealla tavalla.

Taulukko 6.1 Esimerkkejä haitallisista orgaanisista yhdisteistä ja lääkeaineista (mukailtu Marttinen ym. 2014).

Aine/aineryhmä	Käyttökohde/päästölähde
Polyklooratut bifenyylit (PCB)	Elektroniikkateollisuus, maalit, liuottimet
Polyklooratut dibentso- <i>p</i> -dioksiinit ja furaanit (PCDD/F)	Ei valmisteta, mutta yhdisteitä muodostuu mm. palamisprosesseissa.
Polybromatut difenyylieetterit (PBDE)	Palonsuoja-aine, muovit, elektroniikkateollisuus, sisustustekstiilit
Polyaromaattiset hiilivedyt (PAH)	Öljyt ja muut petrokemian tuotteet. Palamisprosessit.
Perfluoratut alkyylilyhdisteet (PFC)	Tekstiilit, sammutusvaahdot, teollisuus- ja kuluttajakemikaalit (mm. teflonin valmistus)
Nonyylifenolietoksyylaatit ja nonyylifenolit (NPEO, NP)	Käytetään muovien pehmentiminä
Ibuprofeeni, ketoprofeeni	Tulehduskipulääke
Diklofenaakki	Tulehduskipulääke tabletteina, lihassärkyyn voiteena

Haitalliset orgaaniset yhdisteet ja lääkeaineet sisältävät ominaisuuksiltaan hyvin erilaisia yhdisteitä ja yhdisteryhmiä, jotka käyttäytyvät erilaisissa käsittelyvaiheissa ja prosessoinneissa hyvin eri tavoin. Osa hajoaa jätevedenpuhdistamolla, osa päättyy suurimmaksi osaksi purkuvesien mukana vesistöihin, osa taas sitoutuu lietteeseen, osa hajoaa biokaasuprosessissa ja jäljelle jääneet yhdisteet jakautuvat mahdollisissa jatko-prosessoinneissa vielä ominaisuuksiensa mukaan eri jakeisiin, kiinteisiin ja nestemäisiin tuotteisiin. Ympäristöön päätyessään osa yhdisteistä hajoaa auringon valon vaikutuksesta, mutta osa on taas hyvinkin pysyviä. Pysyvät yhdisteet, kuten dioksiinit, PBDE, PCF, aiheuttavat suurimman riskin, koska ne voivat kertyä maaperään ja päätyä siten edelleen esimerkiksi ravintoketjuun. Osa aineista voi kulkeutua edelleen valuma- ja suoto-vesien mukana ja päätyä pohjaveteen ja vesistöihin. Elimistöön päätyessään nämä yhdisteet voivat häiritä mm. maksan, munuaisten, kilpirauhasen ja hormonien toimintaa sekä aiheuttaa syöpää. Tutkimustietoa yhdisteiden esiintymisestä ja riskeistä on vielä melko niukasti. Biosafe-hankkeen loppuraportin (Marttinen ym. 2014) mukaan suurimmalla osalla ko. hankkeessa tutkituista kemikaaliryhmistä biokaasulaitosten lopputuotteiden peltolevitys ja ilmalaskeuma aiheuttivat samaa suuruusluokkaa olevan maaperäkuormituksen, eikä kuormituksen arvioitu vaarantavan elintarviketurvallisuutta. Kuitenkin esimerkiksi PBDE-yhdisteiden kuormitus oli merkittävästi suurempi peltolevityksen kautta ja riskin arviointiin tarvittaisiin lisää tietoa.

### 6.3 Määtysjäännöksen käsittely- eli prosessointivaihtoehtoja

Määtysjäännös voidaan yleensä hyödyntää sellaisenaan, mutta erityisesti laitoskoon kasvaessa sen jatkokäsittely on massa- ja ravinnevirtojen hallinnan vuoksi tarpeellista. Jatkokäsittelymenetelmiä valittaessa tulee arvioida, mihin käyttökohteeseen prosessoinnin lopputuloksena tuotettavia tuotteita on tarkoitus hyödyntää ja millä menetelmillä on mahdollista päästä ko. käyttökohteen edellyttämiin ominaisuuksiin ja tuotteisiin.

Lisäksi on huomioitava voimassa olevan lainsäädännön, erityisesti sekä kotimaisen lannoitevalmistelainsäädännön että EU-tason säädösten aiheuttamat vaatimukset. Kasvinravinnepölyssä on otettava huomioon myös peltokäyttöön vaikuttavat ns. nitraattiasetus ja maatalouden ympäristökorvauksen ehdot (ks. luku 9).

#### 6.3.1 Erotusprosessit

Useimmiten määtysjäännöksen käsittely alkaa erotusprosessista eli määtysjäännöksen jakamisesta neste- ja kuivajakeeseen. Erottelun peruslähtökohtana on pyrkiä erottamaan kiintoaine erilleen, mutta usein samalla haetaan myös fosforin mahdollisimman tehokasta erotusta. Erotusprosesseja on lukuisia ja ne voidaan jakaa toimintaperiaatteeltaan kolmeen ryhmään eli eroteltavien komponenttien ominaispainoeroihin perustuviin menetelmiin, partikkelikokoon perustuviin menetelmiin ja haihdutus-/kuivausmenetelmiin (Taulukko 6.2).

Taulukko 6.2 Erotusprosessien toimintaperiaatteet ja menetelmät (Luostarinen ym. 2011).

Toimintaperiaate	Menetelmä
Ominaispainoeroihin perustuvat	Laskeutus, linko
Partikkelikokoon perustuvat	Seula, suotonauha, ruuvikuivain, kalvotekniikat
Termiset	Haihdutus, kuivaus

Erotusprosessien tavoitteena on yleensä myös jakaa määtysjäännöksen sisältämää typpeä ja fosforia eri jakeisiin eli tuottaa typpipitoista nestejakeetta ja fosforipitoista kuivajakeetta. Nestejakeesta käytetään usein myös termiä rejektivesi. Molemmat jakeet sisältävät erottelun jälkeen edelleen sekä typpeä että fosforia, mutta ravinnesuhteet muuttuvat. Ravinnesuhteiden muutokseen vaikuttavat sekä määtysjäännöksen raaka-ainepohja että käytetty erottelumenetelmä. Lähtökohtaisesti mitä isompi määrä ravinteista on vesiliukoisessa muodossa, sitä isompi on nestejakeeseen

päätyvä määrä. Esimerkiksi puhdistamolietteestä peräisin olevassa mädätysjäätännöksessä on hyvin vähän liukoista fosforia, jolloin myöskään nestejakeeseen sitä ei silloin juuri päädy. Toisaalta taas lantaa ja teollisuuden sivutuotteita käsittelevän laitoksen rejektivedessä on myös fosforia (Taulukko 6.3).

Taulukko 6.3 Esimerkki biokaasulaitoksen raaka-aineiden vaikutuksesta mädätysjäätännöksestä erotetun nestejakeen ravinnepitoisuuksiin (erotettu lingolla).

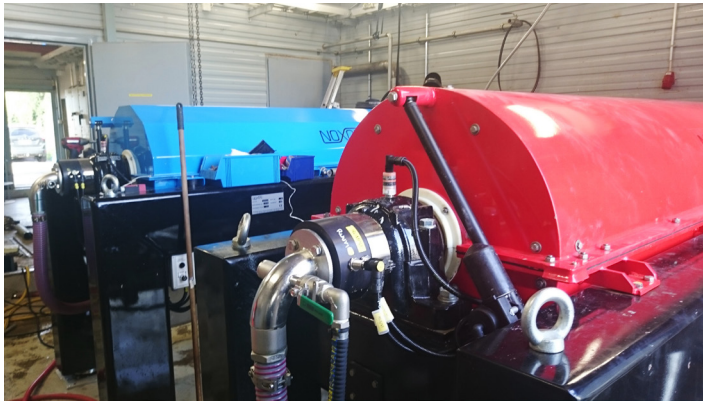
Raaka-aineet	N <sub>tot</sub> (g kg <sup>-1</sup> )	P <sub>tot</sub> (g kg <sup>-1</sup> )	N:P-suhde
Puhdistamoliete	3,7	0,1	37
Lanta ja teollisuuden sivutuotteet	7,0	1,0	7

Yleisimmin mädätysjäätännöksen mekaanisessa erottelussa käytetään ruuvipuristinta, suotonauhakuivainta (Kuva 6.1) tai linkoa (Kuva 6.2), joista jälkimmäinen on yleisin. Menetelmien erottelutehokkuus kuiva-aineen ja ravinteiden suhteen on kuitenkin hyvin erilainen. Myös laskeuttamista voidaan jossain tapauksessa hyödyntää, jos mädätysjäätännöksen kuiva-ainepitoisuus on alle 3 %. Muiden Taulukossa 6.2 mainittujen erotusmenetelmien kannalta mädätysjäätännös sisältää yleensä liikaa kiintoainetta, eivätkä ne ole siten teknisesti toteuttamiskelpoisia ensimmäisenä erotteluprosessina. Niitä hyödynnetään kuitenkin nestejakeen jatkokäsittelyssä.

Erotustehokkuuteen voidaan vaikuttaa kemikaalein, ja yleisesti käytetäänkin polymeerejä. Ruuvipuristimella saadaan useimmiten tuotettua hyvinkin kuivaa kuivajaetta, mutta laite puristaa helposti hienojakoista ainetta seulan läpi nestejakeeseen, jolloin ravinteiden erottelutehokkuus jää massataseena tarkasteltuna alhaiseksi. Ruuvipuristimen erotustehokkuus on parempi mitä kuitupitoisempaa mädätysjäätännös on. Suotonauhan toiminta riippuu erityisesti veden ja kiintoaineen erottuvuusominaisuuksista. Yleensä sillä ei yllätä yhtä kuivaan kuivajakeeseen kuin lingolla tai ruuvipuristimella. Kuivajakeen saaminen kasalla pysyvään muotoon voi olla haastavaa. Suotonauhoihin on saatavilla erilaisia viirakankaita, joiden valinnalla laitteen toimintaa voi optimoida. Tehokkain menetelmä, erityisesti ravinteiden erotuksen näkökulmasta, on linko. Linko toimii useimmiten myös sellaisissa tapauksissa, joissa mädätysjäätännös on hyvin hienojakoista, eikä enää juurikaan sisällä mitään kuituja. Linko vie myös vähemmän tilaa kuin suotonauha.

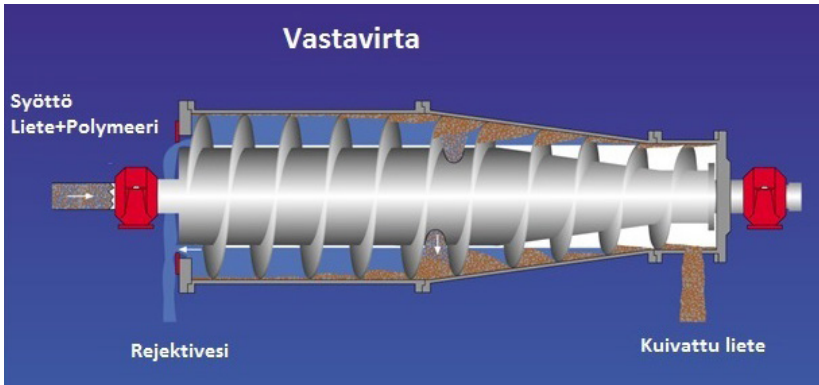


Kuva 6.1 Kaksi suotonauhakuivainta Biovakan Turun biokaasulaitoksella ja suotonauhan puhdistamolieteräisistä määtysjäätännöksestä erottamaa kiintoainetta. Suotonauhat olivat käytössä laitoksen toiminnan alkuvuosina. Kuvat: Teija Paavola (vasen) ja Sari Luostarinen (oikea).



Kuva 6.2 Määtysjäätännöksen erottelussa käytetään linkoja Vehmaan biokaasulaitoksella. Kuva: Teija Paavola

Linkoamisessa eli sentrifugoinnissa hiukkasiin kohdistetaan pyörivän rummun aiheuttama keskipakoisvoima. Pyörimisnopeutta kasvattamalla voidaan saavuttaa 1000–4000-kertainen kiihtyvyys verrattuna maan vetovoimaan. Useimmiten lietteisiin lisätään polymeeriä ennen linkoa veden erottamisen tehostamiseksi. Yleisimmin käytössä ovat dekantterilingot (Kuva 6.3), joissa käsiteltävä liete pumpataan pyörivän rummun sisään, jolloin ominaispainoltaan muita raskaammat hiukkaset ajautuvat ulkoreunalle. Rummun sisällä on laakeroitu ruuvi, jonka nopeus poikkeaa rummun nopeudesta. Nopeuseron vuoksi ruuvi siirtää ulkokehälle kertynyttä kiintoainetta kohti rummun kartiomaiseksi muotoiltua kiintoaineen poistopäätä. Rummun vastakkaisessa päässä ovat nestejakeen poistoaukot, jotka sijaitsevat kuivajakeen poistoaukkoja ulommalla kehällä.



Kuva 6.3 Dekanterilinko, sen rumpu, ruuvi sekä kiintoaineen ja nesteen erottuminen. (Noxon Oy).

Dekanterilingon erotteluominaisuuksiin, kapasiteettiin ja energiankulutukseen vaikuttavat laitteen ominaisuuksien lisäksi käyttösäädöt, kuten pyörimisnopeus, pyörimisnopeuden ero, patolevyjen korkeus, viipymä ja erottelutilavuus. Yleensä tavoitteena on mahdollisimman kirkas nestejäte ja mahdollisimman kuiva, kasalla pysyvä kuivajäte. Kaikilla materiaaleilla tämä ei kuitenkaan aina ole mahdollista.

Apuaineena käytettäviä polymeerivaihtoehtoja on vähintäänkin kymmeniä erilaisia, jotka toimivat eri tavoin eri raaka-aineilla ja eri lämpötiloissa. Myös polymeerin syöttökohdalla eli reagointiajalla käsiteltävän lietteen kanssa ennen varsinaista veden erotuskohtaa on merkitystä, ja tämä vaihtelee eri polymeereillä. Liian lyhyt reagointiaika ei mahdollista optimaalista flokkautumista. Vastaavasti liian pitkä reagointiaika voi aiheuttaa lingon tukkeutumista tai flokin hajoamisen jo ennen veden erotusvaihetta. Optimaalisen polymeerin löytymiseen saattaa mennä hieman aikaa, mutta polymeeritoimittajat auttavat toiminnanharjoittajia tämän haasteen ratkaisemisessa. Käytännössä mädätysjäännökselle pyritään löytämään tavoitteeseen nähden mahdollisimman hyvä kompromissi kaikista säädöistä ja polymeereistä.

### 6.3.2 Nestejakeen jatkokäsittely

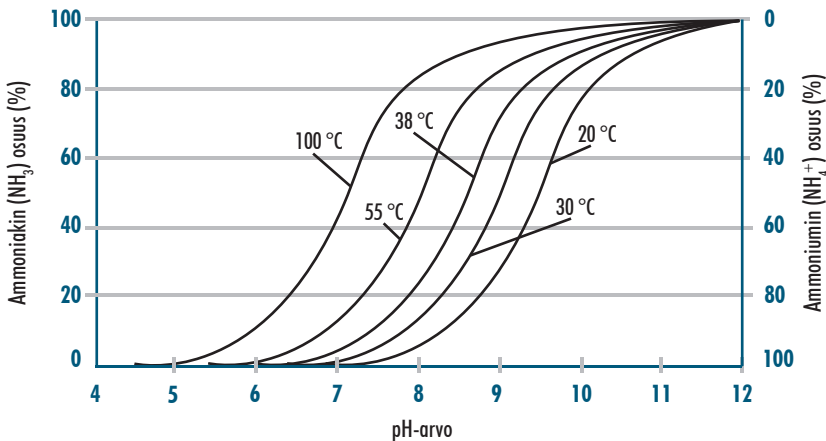
Mädätysjäännöksestä erotettu nestejäte voi olla hyödynnettävissä sellaisenaan lannoitevalmisteena. Käytännössä pohjoiset ilmasto-olosuhteet luovat kuitenkin tarvetta jatkokäsittelylle, etenkin maatilamittakaavaa isommissa biokaasulaitoksissa. Nestejakeen mahdollisia jatkokäsittelymenetelmiä ovat mm. strippaus, haihdutus, kiteytys, biologinen käsittely, kemiallinen käsittely ja kalvosuodatustekniikat. Näistä Suomessa on käytössä isoimmilla biokaasulaitoksilla ainakin strippaus, haihdutus ja biologinen käsittely sekä kalvotekniikka.

Ammoniumtyyppiä ( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ) voidaan poistaa nestejakeesta erottamalla sitä ammoniakkinä ( $\text{NH}_3$ ) nesteestä kaasufaasiin, jolloin puhutaan strippauksesta. Kaasufaasissa oleva tyyppi on mahdollista ottaa talteen hyödynnettävässä ja käyttökelpoisessa muodossa joko pesurin avulla tai lauhduttamalla ammoniakkaa sisältävä vesihöyry takaisin vedeksi. Tyypin erottamistehokkuuteen ammoniakkinä vaikuttavat pH ja lämpötila, koska ne vaikuttavat ammoniakkin ja ammonium-ionien väliseen tasapainoon (Kuviot 6.2 ja 6.3). Lämpötilaa tai pH:ta nostettaessa, tasapaino siirtyy vasemmalle eli ammoniumionit menettävät sähkövarauksensa ja muuttuvat ammoniakiksi. Alhaisessa lämpötilassa ja pH:ssa yhdiste on ionimuodossaan. Ammoniakki on haihtuva yhdiste, kun taas ammoniumioni sitä ei ole.

**Ammoniakkin ja ammoniumionien  
tasapainoyhtälö vesiliuoksessa**  
 $\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{NH}_4^+ + \text{OH}^-$

**Erotetun ammoniakkin talteenotto rikkihapolla**  
 $2 \text{NH}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4 \leftrightarrow (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$

Kuvio 6.2 Ammoniakkin erotuksen ja talteenoton kemialliset yhtälöt.



Kuvio 6.3 Ammoniakki-ammoniumioni-tasapaino lämpötilan ja pH:n funktiona. Kuvio mukaeltu lähteestä Fricke ym., 2007.

Strippaus perustuu veden ja ammoniakkin erilaiseen haihtuvuuteen sekä erotustekijään eli useimmiten ilmaan. Kun pH ja/tai lämpötila ovat riittävän korkeat, ammoniakki helpommin haihtuvana yhdisteenä haihtuu kaasufaasiin. Ammoniakin osapaineet kaasu- ja nestefaaseissa pyrkivät saavuttamaan tasapainon, jonka vuoksi ilmamäärällä voidaan vaikuttaa ammoniakkin kaasufaasiin siirtymisen tehokkuuteen. Suurempi ilmamäärä alentaa ammoniakkin pitoisuutta ja siten osapainetta kaasufaasissa edistämällä siten ammoniakkin haihtumista nesteestä.

Mädätysjäännöksestä erotetun nestejakeen pH on yleensä 7,5–8,0. Nestejakeen lämpötila taas voi vaihdella paljonkin riippuen siitä, mikä on biokaasuprosessin lämpötila ja tehdäänkö mekaaninen erotus heti biokaasuprosessin jälkeen vai johdetaanko mädätysjäännös ensin jälkikaasualtaaseen. Jälkimmäisessä tapauksessa myös viipymä jälkikaasualtaassa voi vaikuttaa mädätysjäännöksen lämpötilaan. Käytännössä käsiteltävän nesteen pH:ta ja/tai lämpötilaa säädetään ennen varsinaista strippausprosessia ammoniakkin erotuksen tehostamiseksi. pH:n säädössä käytetään yleensä lipeää eli natriumhydroksidia (NaOH). pH:ta voidaan nostaa myös poistamalla hiilidioksidia ennen strippausprosessia (Kuva 6.4). Mitä korkeammassa lämpötilassa strippausprosessia ajetaan, sitä vähemmän tarvitaan lipeää. Typen lisäksi strippausprosessissa kaasufaasiin siirtyy pieniä määriä orgaanisia happoja.

Käsiteltävä nestejake syötetään strippauskolonniin ylhäältä ja poistetaan kolonnin pohjalta. Ilmavirtaus on vastakkaiseen suuntaan eli alhaalta ylöspäin. Strippauskolonneissa käytetään yleensä täytekappaleita (Kuva 6.5) tai reikälevyjä lisäämään kontaktipinta-alaa ja -aikaa. Täytekappaleilta edellytetään hyvää kemiallista ja lämmön kestävyyttä sekä alhaista puhallusvastusta.

Ammoniakin strippaukseen kuuluu myös talteenottoyksikkö (Kuva 6.4). Useimmiten talteenottoyksikkö on pesuri, joka on rakenteeltaan samanlainen kuin strippauskolonni. Pesurissa kaasufaasiin haihtunut ammoniakki sidotaan pesuliukseen. Myös pesurissa käytetään täytekappaleita. Ammoniakkia sisältävä ilma johdetaan pesurin alaosaan ja pesuneste yläosaan. Ammoniakista puhdistunut ilma johdetaan takaisin strippausyksikköön. Pesuri toimii pH-alueella neutraalista happamaan, jolloin ammoniakki saadaan jälleen ei-haihtuvaan ammoniummuotoon. Pesunesteenä voidaan käyttää vettä, mutta useimmiten jotain happoa, kuten rikki- ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) tai typpihappoa ( $\text{HNO}_3$ ). Muodostuneen tuotteen ominaisuudet riippuvat käytetystä haposta, rikkihapon tuottaessa ammoniumsulfaattia ( $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ) ja typpihapon ammoniumnitraattia ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ). Ammoniumsulfaattiliuksen typpipitoisuus voi olla enimmillään lähes 10 % ja vähemmän käytetyn ammoniumnitraattiliuksen teoriassa selvästi tätä enemmän. Käytännössä toteutunut typpipitoisuus riippuu strippaus- ja talteenotto-prosessin toiminnasta, eikä teoreettisiin maksimipitoisuuksiin aina päästä. Parhaimmillaan strippausprosessilla on raportoitu päästävän



määtysjäätännöksestä erotetun nestejakeen käsittelyssä jopa 80–95 %:n ammoniumtypen talteenottotehokkuuksiin (Luostarinen ym. 2011). Talteenotto voidaan tehdä myös ilman varsinaista pesuria lauhduttamalla eli jäädyttämällä ammoniakkia sisältävä vesihöyry takaisin vedeksi, jolloin muodostuu ns. ammoniumvettä. Lauhdutusprosessin tuottama ammoniumvesi on yleensä happopesurilla tuotettavia liuoksia laimeampaa (~5 %).



Kuva 6.4 Strippausprosessi Envor Biotechin biokaasulaitoksella Forssassa. Vasemmalla takana hiilidioksidin poistoyksikkö, etualalla ammoniakkistripperi, oikealla ammoniakkipesuri. Kuvat: Envor Biotech Oy

Strippausprosessin teknisenä haasteena on esiintynyt laitteiston likaantumista, tukkeutumista, korroosiota ja vaahtoamista (Kuva 6.5). Strippaus myös kuluttaa energiaa (lämpötila, pumput, puhaltimet). Lisäksi on huomioitava mahdolliset pH:n säädön ja pesunesteen kustannukset. Prosessi tulee kysymykseen lähinnä maatilamittakaavaa selvästi isommissa biokaasulaitoksilla. Erilaisilla strippausmenetelmillä tuotetut liuokset ovat kuitenkin huomattavasti lähtöainettaan (nestejakeen typpipitoisuus <0,5 %) väkevämpiä, ja siten niiden kuljettaminen käyttökohteisiin pidemmällekin on kannattavampaa. Menetelmää voidaan hyödyntää myös sellaisten nestejakeiden typen talteenotossa, jotka eivät sellaisenaan muuten lannoitevalmistekäyttöön sovellu tai niitä ei ole järkevää sellaisenaan laimeana nesteinä kuljettaa hyödynnettäväksi tai varastoida. Tuotettuja typpiliuoksia voidaan hyödyntää maataloudessa kasvinravinteena ja teollisuussovelluksissa korvaamaan esimerkiksi ureaa.



Kuva 6.5 Esimerkki strippauskolonnissa käytetyistä täytekappaleista, jotka ovat likaantuneet.  
Kuva Teija Paavola

Mädätysjäännöksestä erotettu nestejake voidaan johtaa haihdutusprosessiin joko suoraan kiintoaineen erotuksen jälkeen tai strippausprosessin jälkeen. Haihdutusprosessissa nesteen pH säädetään happamaksi, tasolle 5–6, yleensä rikkihapolla. Haihdutus tehdään alipaineessa ja noin 80 °C:n lämpötilassa. Alipaine mahdollistaa veden kiehumisen alhaisemmassa lämpötilassa kuin 100 °C. Haihturi on ulkoapäin katsottuna pitkä putki (Kuva 6.6), jonka sisällä on ennalta mitoitettu nippu ohuita putkia. Putkien määrä vaihtelee useista sadoista jopa tuhansiin riippuen halutusta kapasiteetista. Putkiniput on edelleen jaettu osastoihin, esim. kolmeen. Haihdutettava neste pumpataan haihturin yläosaan, josta se valuu haihturin sisällä olevien putkien pintoja pitkin ja vettä haihtuu (ns. laskevakalvo-haihdutin, Falling Film, FF-haihdutin). Haihdutettavaa nestettä kierrätetään osastoittain takaisin haihturin yläosaan, osan valuessa haihturin alaosassa ylivuotona osastosta toiseen, kunnes päätyy poistettavaksi prosessista. Mädätysjäännöksestä erotussa nestejakeessa on aina mukana myös kiintoainetta, joten täysin ns. kuiviin nestettä ei voi ”kiehuttaa”. Kiintoaineen määrä taas riippuu laitoksella käsiteltävien raaka-aineiden ominaisuuksista, biokaasuprosessin olosuhteista ja erotusprosessin tehosta. Haihturissa nesteen kuiva-ainepitoisuus nousee osasto osastolta, jolloin myös viskositeetti nousee. Viskositeetti lopulta määrittelee, mihin kuiva-ainepitoisuuteen käsiteltävä neste voidaan konsentroida. Joillain raaka-aineilla viskositeetti nousee korkeaksi jo kuiva-ainepitoisuudessa 10 %, kun toisilla voidaan päästä vaikka 30 %:iin.



Kuva 6.6 Haihturi Biovakka Suomi Oy:n Vehmaan biokaasulaitoksella (vasemmassa kuvassa ns. haihturin hattuosa ja oikeassa alaosa. Kuvat: Teija Paavola

Haihturissa haihtunut neste lauhdutetaan eli jäädytetään lauhdevedeksi. Veden mukana haihtuu myös orgaanisia happoja ja ammoniakkia, jotka päätyvät lauhdeveteen. Mitä alempana pH pidetään, sitä vähemmän haihtuu ammoniakkia, mutta enemmän happoja ja toisinpäin. Lauhdevettä voidaan hyödyntää laitoksella teknisenä vetenä mm. polymeeriliuoksen valmistuksessa sekä biokaasuprosessissa käsiteltävien raaka-aineiden laimennuksessa syöttösakeuteen. Lauhdevettä voidaan käyttää laimentamisessa rajoituksetta, koska sen typpipitoisuus on joka tapauksessa niin alhainen ettei se enää nosta biokaasuprosessin typpipitoisuutta (typpi-inhibitio). Ylimäärä voidaan johtaa jätevedenpuhdistamolle, mikäli puhdistamo pystyy ottamaan vastaan erittäin laimeaa vettä sen häiritsemättä puhdistusprosessia, tai lauhdevesi voidaan puhdistaa biokaasulaitoksen yhteydessä ympäristöön johtamiskelpoiseksi. Puhdistetun lauhdeveden johtaminen ympäristöön katsotaan jäteveden johtamiseksi, joten siihen on oltava ympäristölupa.

Lauhdeveden ominaisuudet riippuvat biokaasulaitoksessa käsitellyistä raaka-aineista, prosessointiolosuhteista, kuten biokaasuprosessin lämpötilasta ja viipymästä sekä jatkojalostusprosessien ajotavoista ja tavoitteista. Lauhdeveden puhdistusprosessina voidaan käyttää esimerkiksi kalvotekniikkaa. Muita tekniikoita voisivat olla aerobinen käsittely eli ilmastus ja selkeytys sekä ioninvaihto. Kalvotekniikka on kuitenkin aiemmin menetelmä, jota toistaiseksi lauhdeveden puhdistuksessa laitosmitakaavassa käytetään.

Kalvotekniikka on fysikaalinen erotusmenetelmä, jossa hyödynnetään puoliläpäiseviä kalvoja. Kalvotekniikalla on mahdollista päästä korkeisiin erotusasteisiin sekä erotella tarvittaessa jopa hyvin spesifisiä yhdisteitä. Kalvotekniikka jaetaan kalvojen eli membraanien huokoskoon perusteella mikro-, ultra- ja nanosuodatukseseen sekä käänteisosmoosiin. Erilaisilla kalvoilla pystytään erottelemaan nesteestä hyvin pienikokoisia epäpuhtauksia, kuten bakteereita, viruksia, erilaisia kemiallisia yhdisteitä ja käänteisosmoosilla myös suoloja. Kalvo jakaa käsiteltävän nesteen kahteen jakeeseen. Kalvon syöttöpuolelle jäänyttä jaetta kutsutaan retentatiksi eli konsentraatiksi ja kalvon läpäissyt jae on nimeltään permeaatti. Yleisimmin nesteen jakautumisessa käytetään ajavana voimana painetta, jolloin yhdisteitä siirtyy väkevämmästä liuoksesta laimeampaan liuokseen kalvon läpi. Siirtymänopeuteen vaikuttavat paineen lisäksi nesteen viskositeetti ja kalvon vastus.

Kalvoja valmistetaan käyttötarkoituksesta riippuen erilaisista synteettisistä ja luonnonmateriaaleista. Lisäksi kalvolaitteistot voivat olla ns. tasokalvoja, spiraalimoduuleja ja putkimaisia kalvoja. Kalvotekniikkojen suurimpana haasteena on kalvojen likaantuminen, tukkeutuminen ja kuluminen. Kalvoja voidaan pestä vastavirtahuuhtelulla, kemikaalipesulla ja ilmastamalla. Yleensä mekaanista puhdistusta kalvot eivät kestä ja sen estää myös modulaarinen rakenne.

Lauhdeveden kemiallisten ominaisuuksien ja tavoiteltavan tuloksen perusteella valitaan sopiva kalvotyyppi. Valinnassa on syytä hyödyntää kalvotekniikan asiantuntijoita. Yleisesti ottaen lauhdevesi sisältää liuenneita orgaanisia yhdisteitä, suoloja ja typpeä, joiden poisto edellyttää käänteisosmoositekniikkaa. Käänteisosmoositekniikan avulla on mahdollista puhdistaa lauhdevesi ympäristöön johtamiskelpoiseksi, jolloin esimerkiksi typpipitoisuus on alle 15 mg litra<sup>-1</sup> (Kuva 6.7).



Kuva 6.7

Biokaasulaitokselta ympäristöön johdettava puhdistettu lauhdevesi. Kuva Biovakka Suomi Oy/Vehmaan laitos, Teija Paavola

Määtysjäätännöksestä erotettu nestejake voidaan jatkokäsittelällä myös aerobisten jätevedenkäsittelytekniikoiden avulla, mikäli sitä ei voida tai haluta hyödyntää lannoitevalmisteena sellaisenaan. Kyseessä on tällöin erilaiset ilmastusprosessit, joiden avulla pyritään edelleen biologisesti hajottamaan nesteessä olevaa orgaanista ainetta. Määtysjäätännöksestä erotettu nestejake on varsin väkevää normaaliin yhdyskuntajäteveteen verrattuna. Esimerkiksi typpipitoisuus voi olla 10-kertainen. Biokaasulaitosten yhteydessä aerobisia menetelmiä käytetäänkin lähinnä esikäsitteilynä alentamaan nestejakeen kuormitusta ennen sen johtamista varsinaiselle jätevedenpuhdistamolle. Biokaasulaitoksen suunnitteluvaiheessa on tärkeää varmistaa vastaanottavan jätevedenpuhdistamon mahdollisuudet vastaanottaa kuormitusta, mikäli tätä vaihtoehtoa halutaan käyttää.

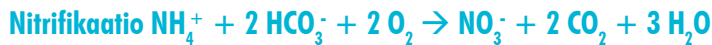
Perinteisin aerobinen sovellus on aktiivilieteprosessi, joka perustuu vapaan mikrobimassan hyödyntämiseen orgaanisen aineen poistossa. Prosessit voivat olla myös mikrobien muodostamiin biofilmeihin perustuvia, kuten biosuotimet ja kantaja-aineellisetprosessit. Aktiivilieteprosessiin kuuluvat ilmastusallas (Kuva 6.8) ja jälkiselkeytysallas, jossa bakteerimassa laskeutetaan ja kierrätetään osittain takaisin ilmastukseen. Osa massasta poistetaan ylijäämälietteenä ja johdetaan edelleen lietteenkäsittelyyn. Aktiivilieteprosessin yhteydessä pyritään yleensä myös biologiseen typen poistoon, jolloin tavoitteena on muuntaa typpi yhdisteet typpikaasuksi ( $N_2$ ).



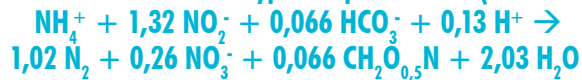
Kuva 6.8 Biokaasulaitoksen määtysjäätännöksestä erotetun nestejakeen esikäsitteilylaitoksen ilmastusallas (Lakeuden Etappi Oy) Kuva: Teija Paavola

Typen biologisia poistoprosesseja on useita erilaisia (Kuvio 6.4). Perinteisessä menetelmässä typpi ensin nitrifoidaan nitraatiksi ja sen jälkeen denitrifoidaan typpikaasuksi. Vaihtoehtoiset typenpoistoprosessit perustuvat ammoniumtypen anaerobiseen hapettamiseen. Näitä prosesseja

on kehitetty 1990-luvulta lähtien, ja myös täydenmittakaavan sovelluksia on olemassa (esimerkki Suomessa: Lakeuden Etappi Oy:n biokaasulaitoksen nestejakeen esikäsitteily DEMON-tekniikalla). Prosessivariaatioita on runsaasti ja niitä markkinoidaan eri nimillä. Prosessit kuitenkin perustuvat vastaavien bakteerien toimintaan. Vaihtoehtoisten typenpoistoprosessien etuja perinteiseen menetelmään verrattuna ovat vähäisempi lietteen tuotto ja alhaisempi hiilen tarve. Myös ilmastutarve on vähäisempi, mikä alentaa energiankulutusta ja siten kustannuksia. Nämä menetelmät soveltuvat perinteistä menetelmää paremmin juuri biokaasulaitosten mädätysjäännöksestä erotetun nestejakeen käsittelyyn, koska nestejakeessa on korkea ammoniumtyppipitoisuus, matala orgaanisen aineen ja typen suhde sekä korkea lämpötila.



#### Anaerobinen ammoniumtypen hapettaminen (ANAMMOX)



#### Deammonifikaatio (DEMON)



Kuvio 6.4 Biologisen typenpoiston kemialliset kaavat (Luostarinen ym. 2011)

### 6.3.3 Kuivajakeen jatkokäsittely

Mädätysjäännöksestä mekaanisesti eroteltu kuivajae varastoidaan yleensä aumoissa, mutta pääsääntöisesti se ei enää itsestään kompostoidu eli aumassa käännellessä massan lämpötila ei lähde nousemaan. Kuivajae voidaan hyödyntää peltokäytössä sellaisenaan tai sitä voidaan haluttaessa aktiivisesti jälkistabiloida, jolloin materiaalin mukaan sekoitetaan mm. turvetta, hiekkaa, haketta tms. ja seos aumataan kentälle. Sekoituksessa massa ilmastuu ja sen ominaisuudet, kuten käsiteltävyys, hieman muuttuvat. Jälkistabiloinnin aikana massa muuttuu edelleen hajuttomampaan suuntaan, jolloin sen jatkojohdyntäminen mullan raaka-aineena ja viher-rakentamisessa on mahdollista.

Kuivajae voidaan myös kompostoida, jolloin kuivajakeen mukaan seostetaan merkittäviä määriä esimerkiksi puu- tai oksahaketta, kuorta, turvetta tai turpeen ja puuainesten seoksia ja seostettu massa aumataan kentälle. Seostamisella varmistetaan ilman pääsy kompostoituvaan massaan, kos-

ka kompostointi on happea vaativa mikrobiologinen prosessi, jossa orgaaninen aine hajoaa ja muuntuu. Hajotustoiminnan tuloksena vapautuu vettä, hiilidioksidia, orgaaniseen ainekseen sidottuja ravinteita sekä aina kompostoinnin aktiivivaiheessa myös lämpöenergiaa. Jälkikompostoinnissa lisättävän seosmateriaalin määrä voi olla jopa puolet massasta. Ilman riittävää seosainetta varsinainen kompostoitumisprosessi ei yleensä käynnisty, koska mädätetyssä massassa ei ole enää riittävästi helposti hajoavaa orgaanista ainesta jäljellä. Jälkikompostoinnin tavoitteena voi olla massan hygienisointi, mikäli sitä ei ole tehty jo biokaasuprosessoinnin yhteydessä. Kompostoinnissakin hygienisoituminen saavutetaan pääasiassa lämpötilan nousun seurauksena. Lämpötila ja aika vaihtelevat tapauskohtaisesti. Lämpötilan lisäksi hygienisoinnin tehokkuuteen vaikuttavat mikrobien keskinäiset vuorovaikutussuhteet (antagonismi, kilpailu) sekä prosessin aikana mikrobien kasvuolosuhteissa tapahtuvat muutokset (pH, ravinnetilanne). Jälkikompostoinnin tavoitteena voi olla myös tuottaa hyvälaatuista maanparannuskompostia erityisesti viherrakentamiskäyttöön. Maanparannuskompostia voidaan hyödyntää myös maataloudessa. Kompostoinnissa massan sekaan voidaan lisätä erilaisia lisäaineita, kuten hivenravinteita, tuotteen loppukäyttötarkoituksen mukaan.

Kuivajae voidaan jatkokäsitellä myös termisesti kuivaamalla, jolloin massan kuiva-ainepitoisuus nostetaan yli 90 %:iin. Kuivaus tehdään lämmön ja ilmavirran avulla. Massa voidaan pelletöidä joko kuivausprosessin yhteydessä rakeistamalla (ns. suora rakeistus) tai sen jälkeen puristamalla kuivattu aine halutun matriisin läpi. Matriisin avulla voidaan tuottaa hyvin tasakokoista ja stabiilia pellettiä. Pelletit ja rakeet ovat helposti varastoitavissa ja vievät selvästi vähemmän varastotilaa kuin lähtöaineensa. Terminen kuivaus (Kuva 6.9) toimii samalla myös hygienisointiprosessina. Hygienisoitumisen aiheuttaa sekä lämpö että erityisesti massan kuivuminen. Termisen kuivauksen haittapuolena on varsin korkea energiankulutus.



Kuva 6.9 Terminen kuivuri Lakeuden Etappi Oy:n biokaasulaitoksella Kuva: Teija Paavola

## 6.4 Erilaisia lopputuotteita – yleisesittely vaihtoehdoista ja käyttökohteista

Kasvinravinnekäyttöön soveltuvat sekä nestemäiset että kiinteät lopputuotteet. Kasvi- ja eläinperäisiä lopputuotteita voidaan hyödyntää vilja- ja nurmikasveilla sekä vihanneksilla. Ihmisperäisiä raaka-aineita, kuten puhdistamolietettä, sisältävät lopputuotteet soveltuvat kasvinravinnekäytössä viljakasvien lannoitukseen. Nurmelle ko. tuotteita voidaan hyödyntää vain nurmea perustettaessa. Luomukelpoisista raaka-aineista valmistettuja lannoitevalmisteita voidaan hyödyntää myös luomulannoitteina.

Viherrakentamiseen ohjautuu erityisesti puhdistamolietettä sisältäviä kuivajakeita mullan raaka-aineena tai kompostituotteina (tuorekomposti, maanparannuskomposti).

Teollisuussovelluksissa hyödynnetään tällä hetkellä lähinnä nestejakeesta konsentroituja kierrätysravinnetuotteita. Näitä käytetään kemikaalinomaisesti fossiilisin panoksin tai neitseellisistä luonnonvaroista valmistettujen ammoniumsulfaatin, urean ja/tai fosforihapon korvaajina. Tällöin tuotteen turvallisuusnäkökohdat on arvioitava myös kemikaalikäytön näkökulmasta. Haihturiprosessin avulla tuotettua väkevöityä typpi-fosfori-konsentraattia hyödynnetään metsäteollisuuden jätevedenpuhdistamolla ja strippausprosessin avulla tuotettua ammoniumsulfaattia lasivillan valmistuksessa. Myös muita teollisuuskäyttökohteita, kuten savukaasujen pesu, selvitetään.

Konsentroidut kierrätysravinnetuotteet soveltuvat myös lietelantojen typpi-fosforisuhteen parantamiseen. Lannoissa on usein liikaa fosforia suhteessa typpeen, jolloin typpimäärän nostaminen parantaa ravinnesuhdetta ja alentaa mineraalitypen lisäämistarvetta. Väkevöintiprosesseissa käytetään useimmiten rikkihappoa typen sitomiseen, jolloin väkevöidyillä kierrätysravinnetuotteilla on myös rikkilannoitusvaikutus.

Lannoitevalmisteita voi olla siis hyvin erityyppisiä – kiinteitä, multamaisia, nesteitä ja kirkkaita nesteitä (Taulukko 6.4). Kuiva-ainepitoisuudet voivat vaihdella käytännössä noin 1 %:sta 90 %:iin. Myös ravinnepitoisuuksissa tuorepainoa kohden on merkittäviä eroja. Tarkemmat ominaisuudet ja ohjeet tuotteen käytöstä löytyvät aina eräkohtaisista tuoteselosteista, jotka annetaan käyttäjälle tuotteen luovutuksen yhteydessä. Tuoteselosteet löytyvät myös kaikkien toiminnanharjoittajien verkkosivuilta. Tuotteen olomuoto määrittelee levitystekniikan ja pääsääntöisesti ravinnepitoisuuksien perusteella lasketaan käyttömäärät.



Taulukko 6.4 Esimerkkejä markkinoilla olevista lannoitevalmisteista (TS=kuiva-aine, N=kokonaistyppi, P=kokonaisfosfori).

Raaka-aineet	Olomuoto	Kauppanimi	TS (%)	N (g kg <sup>-1</sup> )	P (g kg <sup>-1</sup> )	Käyttökohde
Puhdistamoliete, biojäte	Kiinteä, kasalla pysyvä	Stormossenin nurmikkomulta	76	3	1,9	Viherrakentamiseen, nurmikon perustamiseen
Puhdistamoliete	Kiinteä, kasalla pysyvä	Biovakka Humusvoima	30	11,3	8,3	Vilja- ja energiakasveille, nurmen perustamiseen, mullan raaka-aineeksi viherrakentamiseen
Biojäte, eläin- ja kasvipohjaiset jätteet, lanta	Kiinteä, kasalla pysyvä	Luomukymppi B	24	5,1	1,5	Kaikkeen kasvintuotantoon, myös luomutuotantoon, mullan raaka-aineeksi viherrakentamiseen
Biojäte, puhdistamoliete, elintarviketeollisuuden sivutuotteet	Kiinteä, kasalla pysyvä	Peltoravinne	28	7,2	4,8	Vilja- ja energiakasveille, nurmen perustamiseen, mullan raaka-aineeksi viherrakentamiseen
Lanta, elintarviketeollisuuden lietteet, vihermassat, biojätteet	Neste	Jepuan kasvivoima	3	3,7	0,8	Kaikkeen kasvintuotantoon
Puhdistamoliete, biojäte	Pelletti	RANU - maanparannusrae	90	30	27	Eryisesti syyslannoitukseen ja fosforia vaativille maille/kasveille
Lanta, teollisuuden biohajoavat sivutuotteet	Neste	Biovakka Woimakas	25	25	2,2	Kaikkeen kasvintuotantoon, teollisuuskäyttöön
Biojäte, puhdistamoliete, elintarviketeollisuuden sivutuotteet	Kirkas neste	Envor Typpineste	-	9	0	Kaikkeen kasvintuotantoon, teollisuuskäyttöön

## 6.5 Lannoitekäyttö

Lannoitevalmisteiden valmistuksessa ja käytössä on ympäristö- ja jäte-lainsäädännön lisäksi huomioitava sivutuoteasetus, lannoitevalmiste-lainsäädäntö, nitraattiasetus ja maatalouden ympäristökorvausjärjestel-män ehdot. Luomukäyttöä suunniteltaessa on huomioitava myös luomuun liittyvä lainsäädäntö. Lainsäädäntöä on tarkasteltu laajemmin luvussa 9 Lainsäädäntö ja toiminnan vaatimat luvat.

Lannoitekäyttöön liittyvä lainsäädäntö kehittyy jatkuvasti. Myös maata-louskäyttöön liittyvät säädökset muuttuvat. Näillä on huomattava vaiku-tus käytännön toimintaan, minkä vuoksi kirjan julkaisuhetkellä vallitse-va tilanne on kuvattu seuraavassa pääpiirteissään. Ajantasainen lainsää-däntö on aina syytä tarkistaa.

### 6.5.1 Orgaaninen lannoite, maanparannusaine

Lannoitevalmisteet, mukaan lukien orgaaniset lannoitevalmisteet, jaetaan lannoitevalmistelainsäädännössä erilaisiin tyyppinimiryhmiin. Lisäksi lannoitevalmisteet kuuluvat tyyppinimiryhmiensä sisällä tietyn tyyppi-nimen alle. Tyyppinimiluetteloa ylläpitää Evira, joka myös käsittelee uu-det tyyppinimihakemukset.

Orgaaniset lannoitevalmisteet luokitellaan joko orgaanisiksi lannoitteik-si tai maanparannusaineiksi riippuen niiden valmistuksessa käytetyistä raaka-aineista ja ravinnepitoisuuksista. Orgaaniset lannoitteet valmiste-taan eläin- ja kasvipärisistä raaka-aineista ja ne voivat sisältää korkein-taan 10 % puhdistamolietettä. Lisäksi niiden ravinnepitoisuuksien on yli-tettävä asianomaisen tyyppinimen kohdalla mainitut minimipitoisuudet. Kaikki lannoitevalmisteet, joiden raaka-aineesta yli 10 % on puhdistamo-lietettä tai vastaavaa, sekä muihin ryhmiin muista syistä sopimattomat, luokitellaan maanparannusaineiksi. Mikäli puhdistamolietteen osuus lan-noitevalmisteen raaka-aineista on alle 3 %, sillä ei ole merkitystä tyyppi-nimeen. Käytännössä myös maanparannusaineiksi luokiteltavat lannoite-valmisteet ovat kuitenkin maanviljelyskäytössä ennemminkin lannoitteita.

Tällä hetkellä biokaasulaitosten mädätteet ja mädätteistä valmistetut lan-noitevalmisteet kuuluvat pääsääntöisesti seuraavien tyyppinimiryhmien ja tyyppinimien alle:

- ✓ Orgaanisina lannoitteina sellaisenaan käytettävät sivutuotteet: rejektivesi
- ✓ Orgaaniset maanparannusaineet: maanparannuskomposti, tuorekomposti, kuivarae tai -jauhe
- ✓ Maanparannusaineena sellaisenaan käytettävät sivutuotteet: mädätysjäännös (sekä mädäte sellaisenaan että mädätteestä erotettu kuivajae)

Yli 10 % puhdistamolietettä sisältävien maanparannusaineena sellaisenaan käytettävien sivutuotteiden kohdalla on huomioitava käytön rajoitteet. Näiden käyttö aiheuttaa myös veloitteen seurata muidenkin haitallisten metallien kuin kadmiumin kuormitusta sekä määrittää haitalliset metallit ja pH levitysalueilta ennen levitystä. Määtysjäännöstä ei saa käyttää nurmilla, sellaisenaan syötävillä vihanneksilla eikä taimituotannossa. Varo aika käytön jälkeen on viisi vuotta. Puhdistamolieteperäisen määtysjäännöksen käyttö aiheuttaa myös veloitteen seurata muidenkin haitallisten metallien kuin kadmiumin kuormitusta sekä määrittää haitalliset metallit ja pH levitysalueilta ennen levitystä. Jos maan haitallisten metallien pitoisuus ylittää tai pH alittaa säädetyt raja-arvot, levitys on kielletty. Orgaanisiin maanparannusaineisiin kuuluvien lannoitevalmisteiden levityksen jälkeiset viljelyrajoitukset ovat lievemmät tai niitä ei ole lainkaan, mikäli kyseessä on maanparannuskomposti.

### 6.5.2 Levitystekniikat

Useimmat kiinteät orgaaniset lannoitevalmisteet levitetään kuten kuivainta. Levitykseen on syytä käyttää tarkkuuslevittämiä riittävän hyvän levitystasaisuuden saavuttamiseksi. Ne ovat yleensä pysty- tai vaakakelalevittämiä (Kuva 6.10). Pystykelalevittimissä levityslautaset on integroitu pysty akselin ympäri pyöriviin hajotinkeloihin. Vaakakelalevittimet on varustettu erillisillä levityslautasilla, joiden pyörimisnopeus on säädettävissä erikseen vaaka-akselin ympäri pyörivistä hajotinkeloista. Ne saavat yleensä käyttövoimansa traktorin hydraulikasta. Tämä antaa enemmän mahdollisuuksia levityskuvion säätöön kuin pystykelalevittimen hajotinkeloihin integroidut levityslautaset. Vaakakelalevittimen hajotinkelat ovat peräportin takana vaakasuorassa. Ne saavat käyttövoimansa traktorin voimanottoakselista. Pystykelalevittimissä tällaista peräporttia ei ole. Yleisperävaunuissa (Kuva 6.11) on yleensä vaakakelat, mutta ei levityslautasia eikä peräporttia. Niiden levityskuvio on hyvin kapea, vähän yli vaunun leveyden.



Kuva 6.10 Pystykelalevitin (vasen) ja vaakakelalevitin (oikea). Kuvat: Petri Kapuinen



Kuva 6.11 Lannanlevitin. Kuva: Petri Kapuinen

Yleensä kiinteiden orgaanisten maanparannusaineiden kertalevitysmäärä on noin 20 tonnia hehtaarille. Se määräytyy ns. nitraattiasetuksen kokonaistyyppirajasta lannalle ja lantaa yli 10 % sisältäville lannoitevalmisteille, mutta on varsin sopiva määrä myös useimmille muille orgaanisille maanparannusaineille. Poikkeuksen tästä tekevät kuivarakeet ja -jauheet sekä alueet, joiden peltojen fosforitasot ovat korkeita. Tällöin levitysmäärät voivat jäädä selvästi alhaisemmiksi ja levitystasaisuuteen on kiinnitettävä erityistä huomiota. Levitysmäärä säädetään ensisijaisesti pohjakuljettimen ja ajonopeuden suhteella.

Kuivarakeet ja -jauheet voivat tyyppinimen olomuodosta poiketen olla myös pellettejä. Tasakokoisten pellettien levityskuvio on parempi kuin raekooltaan vaihtelevien tuotteiden. Pellettien ominaispaino on yleensä suuri, jolloin ne leviävät kauas. Hienojakoinen kevyt materiaali taas leviää lyhyen matkan ja kulkeutuu tuulen mukana. Kuivarakeet ja -jauheet levitetään yleensä kalkinlevittimillä. Kalkinlevittimessä on alaspäin kapea säiliö ja pohjalla kapea pohjakuljetin. Levitysmäärät ovat pienemmät kuin muilla orgaanisilla maanparannusaineilla, yleensä alle  $5 \text{ t ha}^{-1}$ . Levityskuvio ja sopiva tehollinen työleveys määritetään vastaavalla tavalla kuin muilla kiinteillä orgaanisilla lannoitevalmisteillä. Kalkinlevittimessä levityskuvioon voidaan yleensä vaikuttaa mm. säätämällä tuotteen putoamiskohtaa levityslautasilla. Levitysmäärää voidaan myös säätää oleellisesti säätöluukulla.

Nestemäisten orgaanisten lannoitevalmisteiden levitystekniikka riippuu ennen kaikkea levitysmäärästä. Jos levitysmäärä on yli  $10 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , hoideaan levitys yleensä lietalannan levityskalustolla. Levitysmäärän ollessa alle  $1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , kasvinsuojeluruisku on mahdollinen levitysväline, jos tuote läpäisee sen suodattimet eli ei sisällä juurikaan kiintoainetta. Suomessa levitysmäärävälille  $1 - 10 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  sopiva kalusto on harvinaista, mutta

kalustoa olisi saatavilla ulkomailta. Tähän levitysmääräväliin osuu esimerkiksi haihduttamalla väkevöidyt nestemäiset lannoitevalmisteet.

Nestemäisten orgaanisten lannoitevalmisteiden ravinnepitoisuudet ovat yleensä suuremmat kuin lietalannan, koska mädätyksessä on käytetty muitakin orgaanisia raaka-aineita kaasun tuotannon lisäämiseksi. Näin ollen myös levitysmäärät ovat yleensä pienemmät kuin lietalannan. Lisäksi mädätetyn nestemäisen orgaanisen lannoitevalmisteiden pH on yleensä korkeampi kuin lietalannan, jonka vuoksi ammoniumtyypen haihtumista ammoniakkina ilmaan on syytä välttää. Ammoniakkitappioita vähentävät toimet, kuten sijoitus tai hapotus, ovat siten erityisen tärkeitä.

Sijoituksessa nestemäinen lannoitevalmiste sijoitetaan maahan erilaisilla vantoilla, jotka voivat olla maahan uran tekeviä kiinteitä tai pyöriväteräisiä kiekkovantaita. Kiekkovantaa läpäisevät paremmin kasvustoa (Kuva 6.12). Nestemäisten lannoitevalmisteiden sijoituksen erityisenä tarkoituksena on estää ammoniakkitappiot, joita syntyy, jos paljon ammoniumtyyppiä sisältäviä lannoitteita levitetään pellon pinnalle ja ne joutuvat tekemisiin ilman kanssa. Yleisesti ottaen sijoituksella saatetaan ravinteet kasvien ravinteiden oton kannalta otolliseen paikkaan. Sijoitus voi olla sijoitusta avoimeen V-railoon, jolloin kontakti maahan on parempi kuin esimerkiksi letkulevityksessä. Kontakti maahan on oleellinen ammoniumtyypen sitomiseksi maahan. Tällöin se ei enää haihdu ilmaan ammoniakkina. Pienimmät ammoniakkitappiot syntyvät täysin peittävästä sijoituksesta. Peittävässä sijoituksessa tarvittava vetovoiman tarve on suurempi kuin avoimessa ja myös laitteet kalliimpia. Peittävässä sijoituksessa työleveys on yleensä pienempi kuin avoimessa suuren vetovoimatarpeen takia. Näiden kahden ääripään välissä on välimuotoja, ja ratkaisu on kompromissi hyötyjen ja kustannusten välillä.



Kuva 6.12 Nestemäisten lannoitevalmisteiden sijoituslaite (vasen) ja letkulevitin (oikea).  
Kuvat: Biovakka Suomi Oy ja Petri Kapuinen

Sijoituslaitteiden lisäksi nestemäisten lannoitevalmisteiden levityksessä käytetään letkulevittimiä, joilla on selkeä työleveys (Kuva 6.12). Lisäksi niiden aloitus- ja lopetuslinjat ovat lähes suorat, mikä helpottaa

päällekkäisen levityksen ja aukkojen välttämistä päisteissä. Päinvastoin kuin kiinteillä tuotteilla nestemäisten tuotteiden suuri levitysmäärä aikayksikössä ei yleensä ainakaan huononna levitystasaisuutta. Letkulevitys voidaan tehdä joko sekä säiliön että levityslaitteistot sisältävällä laitteistolla tai vetoletkulevityslaitteistolla, jossa liete pumpataan lietesäiliöstä tai erillisestä pellon reunalla olevasta säiliöstä runko- ja levityslaukuja pitkin levityslaitteistoon. Tällöin levityskaluston paino on selvästi pienempi ja maaperän tiivistyminen vähäisempää. Vetoletkulevitys on varsin hyvä vaihtoehto alueilla, joissa lohkokoko on suurehko ja lohkot selkeämuotoisia.

Hajalevityksessä nestemäinen tuote levitetään hajotinlevyllä tai ns. superlevittimellä (Kuva 6.13). Hajotinlevy lennättää nestemäisen tuotteen yläkautta ja levityskuviot vastaa vaak- ja pystykelalevittimien levityskuviota kiinteillä tuotteilla. Hajalevityksen keskeisin ongelma suhteessa letkulevitykseen on oikean tehollisen työlevyden valinta, kuten kiinteiden tuotteiden levityksessä vaak- ja pystykelalevittimillä. Siihen vaikuttaa levityksenopeus ja levitettävän tuotteen ominaisuudet, joten se pitäisi määrittää erikseen jokaista levitystilannetta varten, kuten vaak- ja pystykelalevittimillä kiinteitä tuotteita levitettäessä. Lisäksi hajalevityksen ammoniakkitappiot ovat suuret.



Kuva 6.13 Hajalevitystä. Kuva: Petri Kapuinen

Ammoniakkitappioita voidaan alentaa happokäsittelyllä, jota käytetään yleisesti mm. Tanskassa ja Ruotsissa. Käytännössä levitettävän lannoitevalmisteen pH:ta lasketaan rikkihapolla noin arvoon pH 6. Hapetus voidaan tehdä karjasuojassa, varastossa tai levityksen yhteydessä.

Lietelannan levityskalustoon on saatavilla määränsäätöjärjestelmiä, joilla levitysmäärän hallinta on helppoa. Leveitä levityslaitteita käytettäessä päällekkäin ajoja ja haukia voidaan välttää käyttämällä ajo-opastimia. Ne

myös vähentävät kuljettajan kokemaa stressiä ajolinjojen ajamisessa silmämääräisesti.

Lisätietoa orgaanisten lannoitevalmisteiden levittämisestä, varastoinnista ja annostelusta on saatavilla julkaisusta Tontti ym. 2015.

### 6.5.3 Orgaaniset lannoitevalmisteet kasvinravitsemuksessa

Kasvinravitsemuksen kannalta yksi tärkeimmistä satoa määrittelevistä tekijöistä on typpi. Kasvit tarvitsevat käyttökelpoista eli liukoista typpeä 0–240 kg ha<sup>-1</sup> kasvilajista, maaperästä ja satotasosta riippuen.

Nestemäiset orgaaniset lannoitevalmisteet ovat yleensä hyviä typen lähteitä tai suhteellisen tasapainoisia typen ja fosforin lähteitä kasvien ravinteiden käytön kannalta. Kiinteät orgaaniset lannoitevalmisteet, varsinkin puhdistamolietteestä valmistettuna, ovat lähinnä fosforin lähteitä. Kiinteiden tuotteiden levitysmääriä rajoittaakin kokonaistyyppi tai fosfori, jolloin niiden mukana tulee vain 20–40 kg ha<sup>-1</sup> liukoista typpeä. Nestemäisiäkään tuotteita käytettäessä ei ole järkevää tavoitella 100 %:n typpilannoitusta, vaan lisätä osa tyyppistä mineraalityypinä täydennyslannoituksena. Orgaanisten maanparannusaineidenkin merkitys kasvinravinteiden lähteenä on niiden tyyppinimiluokituksesta huolimatta peltoikäkäytössä suurempi kuin niiden merkitys maanparannusaineena.

Orgaanisten lannoitevalmisteiden liukoisen typen pitoisuus voi vaihdella runsaasti verrattuna mineraalilannoitteiden liukoisen typen vaihteluun eikä niiden levitykseen yleensä ole täysin optimaalista levitystapaa kasvien ravinteiden oton kannalta. Nämä haasteet voidaan kuitenkin pääosin välttää käyttämällä täydennyslannoitukseen mineraalityypilannoitteita samalla tavalla levitettynä kuin ne levitettäisiin ainoakin typen lähteenä. Syysviljoille ei tarvitse erikseen antaa mineraalilannoitteen typpeä orgaanisen lannoitteen typen lisäksi perustamisen yhteydessä, vaan normaalilannoitus vasta keväällä riittää.

Yleensä paras satovaste orgaanisten lannoitevalmisteiden liukoiselle tyypelle saadaan, kun ne levitetään kevätkylvöisille kasveille keväällä kylvön yhteydessä tai sitä ennen. Tämä johtuu siitä, että pääosa orgaanisten lannoitevalmisteiden liukoisesta tyyppistä on ammoniummuodossa ja nitraattityppeä ei ole. Ammoniumtypen nitrifikoituminen maassa kestää yleensä pari viikkoa, mikä tekee lannoitusvaikutuksesta hitaamman suhteessa mineraalilannoitteiden vastaavaan.

On myös huomioitava, että keväällä pohjamaan tiivistymisriski on märkyydestä johtuen suuri. Nykyaikaisen levityskaluston rengasvarustus mahdollistaa kuitenkin liikkumisen pellolla silloinkin, kun sitä ei oikeastaan pitäisi tehdä. Nestemäisten orgaanisten lannoitevalmisteiden

levitys voidaankin useissa tapauksissa siirtää kylvön jälkeiseen aikaan, jolloin pohjamaa on todennäköisesti kuivempaa. Kylvön jälkeinen levitys ei edellytä sitä, että oraat ovat tulleet pintaan. Korkea kasvusto alentaisi huomattavasti ammoniakkipäästöjä, mutta toisaalta sellainen kasvusto ei enää kaipaa typpilannoitusta. Lisäksi tällöin maan pinta on jo ehtinyt liettyä niin paljon, että nestemäisten tuotteiden imeytyminen on varsin hidasta. Kasvuston kehittymistä ei siten ole järkevää odottaa, vaan kylvön jälkeinen levitys kannattaa tehdä heti, kun se maan kuivumisen perusteella on tarkoituksenmukaista. Oraalle tullut kasvusto kestää hyvin jopa sijoittamista, mutta renkaiden tallaamalla alueella satotappio kasvaa nopeasti 2-lehtivaiheen jälkeen. Sijoituslaitteiden työleveys on yleensä pienempi kuin letkulevittimien, jolloin pyöränjalkien aiheuttamat satotappiot kasvavat. Tallaustappio ei ole pelkästään määrällinen vaan myös laadullinen. Kylvön yhteydessä mineraalilannoitteena annettavan starttityypen osuus typpiannoksesta on oltava sitä suurempi, mitä myöhemmin kylvön jälkeen orgaanisen lannoitevalmisteen levitys aiotaan tehdä.

Typen hyväksikäytön kannalta syyslevitys on mielekästä ainoastaan syyskylvöisen kasvuston perustamisen yhteydessä. Silloin käyttömäärän pitäisi vastata ainoastaan kyseisen kasvin typen syyslannoitustarvetta. Muut ravinteet voidaan antaa myös seuraavaa kasvukautta varten. Orgaanisista lannoitevalmisteista erityisesti kiinteät puhdistamolieteperäiset tuotteet sopivat syyslannoitukseen, koska niiden liukoisen typen pitoisuus suhteessa esimerkiksi fosforipitoisuuteen on pieni.

## 6.6 Logistiikka ja varastointi

Biokaasulaitos tuottaa lannoitevalmisteita ympäri vuoden. Kasvinravitsemuksessa niitä on järkevää hyödyntää kuitenkin vain noin kahden kuukauden aikana eli keväällä, oraille, nurmen toiselle ja mahdollisesti kolmannelle sadolle ja syksyllä syysviljojen kylvön yhteydessä. Muun ajan lannoitevalmisteet on varastoitava, nestemäiset varastosäiliöissä ja kiinteät aumattuina varastoihin, varastokentille tai pelloille.

Peltokäyttöön menevät kiinteät orgaaniset lannoitevalmisteet pyritään kuljettamaan varastoon peltopattereihin etukäteen silloin, kun maaseudun tiestö ja pellot sen parhaiten kestävät. Käytännössä siis syyskylvöjä varten kuljetukset peltopattereihin alkavat heti puintien jälkeen ja jatkuvat sääolosuhteiden ja nitraattiasetuksen sallimissa rajoissa kevätkylvöihin saakka. Kiinteiden orgaanisten maanparannusaineiden kuljetus peltopatteriin voi aiheuttaa pohjamaan tiivistymisriskin, jos ne kuljetetaan sinne vasta keväällä juuri ennen levitystä maan ollessa märkää. Eikä kuljetuskalustoakaan olisi riittävästi saatavilla, mikäli usean kuukauden aikana tuotetut lannoitevalmisteet pitäisi saada samaan aikaan kuljetettua. Patteroimalla maanparannusaine kuivalle ja kantavalle tai routaantuneelle maalle voidaan maan tiivistysriski ja kuljetusten ruuhkautuminen



välttää. Näin varmistetaan myös, että valmiste on keväällä levitettävissä juuri silloin kuin viljelijä parhaaksi katsoo.

Patteroinnista on tehtävä patterointi-ilmoitus kunnan ympäristöviranomaiselle viimeistään kuukautta ennen suunniteltua patterin perustamista. Ilmoitukseen sisältyy suunnitelma patteroinnista. Jos ympäristöviranomaisilta ei tule tietoa kyseisen kuukauden kuluessa, patterin saa perustaa suunnitelman mukaisesti.

Jotta maanparannusaine voidaan kuljettaa pellolle patteriin, on maan oltava kantavaa tai roudassa. Patterin pohjalle levitetään 20 cm:n kerros turvetta pohjasuodatinmateriaaliksi. Yleensä maanparannusaine ajetaan patteriin soran kuljetukseen tarkoitetuilla kasettiautoilla. Käytännössä jo yksittäinen nuppikuorma muodostaa peltopatterin. Huuhtoutumisen vähentämiseksi olisi kuitenkin hyvä pyrkiä kokoamaan yhteen patteriin suurempi määrä orgaanista maanparannusainetta ja muodostaa siitä yhtenäisen auma. Tämä helpottaa myös patterin kattamista. Yhteen peltopatteriin voidaan sijoittaa sijoituslohkon ja lähilohkojen tarvitsema määrä lannoitevalmistetta. Riippuen patteroitavan materiaalin kuiva-ainepitoisuudesta, koostumuksesta ja patterin korkeudesta, siitä voi valua nestettä patterin alla oleviin maakerroksiin. Kulloinkin voimassa oleva patterointiohjeistus annetaan ns. nitraattiasetuksessa.

Peltopatteri on aina katettava, koska kattamattomasta patterista valuu nestettä ja sen mukana ravinteita ajan kuluessa. Yleensä patteroitavasta materiaalista itsestään valuu nestettä vain noin kuukauden sademäärää vastaava määrä. Siksi kattamisen merkitys on suurempi kuin suodatinkerroksen, koska patterointi kestää tyypillisesti selvästi yli kuukauden. Valumavesi sisältää yleensä tyypeä pääasiassa ammoniumtyypen ja liukoisten orgaanisten tyyppiyhdisteiden muodossa. Siitä ainakin osa voidaan sitoa perustamisen yhteydessä patterin alle asennettavaan suodatinkerrokseen. Suodatinkerros ei yleensä voi sitoa valuvaa nestemäärää, mutta tavoitteena onkin ensisijassa sitoa sen sisältämää tyypeä. Suodatinmateriaalina käytetäänkin mm. turvetta, joka sisältää runsaasti hiiltä ja vähän liukoista tyypeä ja jolla on näin hyvät typensitomisoimaisuudet. Muista orgaanisista maanparannusaineista poiketen maanparannuskompostit sisältävät tyypillisesti myös nitraattia, joka huuhtoutuu ammoniumtyypen tavoin valumaveteen. Erityisesti puhdistamolietteenä valmistetuista maanparannusaineista huuhtoutuu hyvin vähän liukoista fosforia. Valumaa ja ravinteiden huuhtoutumista on käytännössä vain alaspäin. Patterin alle huuhtoutunut tyyppi, jota kasvit eivät käytä kasvukauden kuluessa, nitrifioituu ja huuhtoutuu helposti seuraavan syksyn ja talven aikana pohjavesiin. Oikealla patterin perustamisella tämä voidaan välttää käytännössä kokonaan. Jos patterista muodostuva typen huuhtoutuminen kohdennetaan koko patterin levitysalalle, kuormitus hehtaria kohti on pieni. Pienialainen patteri antaa kuitenkin suhteellisen kustannustehokkaan mahdollisuuden vähentää kuormitusta.

Kiinteän tuotteen kuormaamiseksi levittimeen tarvitaan yleensä erillinen kuormain, mikä lisää kustannuksia. Vain kalkinlevittimissä on yleensä valmiina kourakuormain. Parhaiten tarkoitukseen sopii pyörivä kaivinkone. Kaivinkone vähentää kuormauksesta aiheutuvaa tallaantumista oleellisesti verrattuna pyöräkuormaimen tai etukuormaimellisen traktorin käyttöön, koska sillä ei ajella edestakaisin patterin alueella.

Nestemäiset lannoitevalmisteet varastoidaan betonisissa varastosäiliöissä tai levitysalueiden välittömään läheisyyteen perustetuissa kumimattopohjaisissa varastoissa, joihin ne yleensä kuljetetaan puoliperävaunun yhdistelmällä säiliöautokuljetuksina. Nestemäisen lannoitevalmisteen kuormaaminen ja purkaminen välivarastoon on nykyisin nopeampaa kuin kiinteän, mikä alentaa kuljetuksen pohjahintaa. Kalusto on usein myös varustettu nivellettyyn puumiin kiinnitetyllä imukärsällä. Lisäksi urakoitsijoiden levityskalusto on yleensä varustettu pumppukuormaimella, joten se pysyy itsenäisesti kuormaamaan välivarastosta. Monista nestemäisistä tuotteista laskeutuu varastoaltaan pohjaan kiintoainesta. Nestemäisiä tuotteita onkin sekoitettava koko levityksen ajan, ettei tuotteen koostumus vaihteleva levityksen kuluessa.

Orgaanisten lannoitevalmisteiden kuljetukseen käytetään pitemmillä matkoilla kuorma-autoja. Kuorma-auton puoliperävaunu- ja täysperävaunun yhdistelmien kuljetuskapasiteetti on hyväkuntoisilla maanteillä selvästi suurempi kuin traktorin ja perävaunun muodostamien yhdistelmien suuremman ajonopeuden ja kantavuuden takia. Raskas kalusto vaatii kuitenkin kantavat purkupaikat. Traktorikaluston edut tulevat esille, kun tien kunto heikkenee. Lyhyillä ajomatkoilla levityskalustoa käytetään usein myös kuljetuksiin. Levityskaluston matalapaineisten renkaiden vierintävastus teillä on kuitenkin suuri, mikä lisää polttoainekulutusta merkittävästi. Liikennetraktorit ovat usein hyvä kompromissi kuorma-autoyhdistelmille ja tavallisille maataloustraktori – perävaunun yhdistelmille, kun purkupään tiestö on huonokuntoista mutta kuljetusmatka ei ole kovin lyhyt.

## LÄHTEET JA LISÄTIETOA

Carrington, E.G. 2001. Evaluation of sludge treatments for pathogen reduction – Final report. Study for the European Commission Directorate-General Environment. Report No. CO 5026/1. 44 p. *Linkki e-julkaisuun.*

Fricke, K., Santen, H., Wallmann, R., Huttner, A. ja Dichtl, N. 2007. Operating problems in anaerobic digestion plants resulting from nitrogen in MSW. *Waste Management* 27, 30 – 43.

Jyväskylän yliopisto. 2005. Hajuyhdisteet ennen ja jälkeen mädätyksen. Julkaimaton tutkimusraportti Vehmaan biokaasulaitokselta.

Luostarinen, S., Paavola, T., Ervasti, S., Sipilä, I. ja Rintala, J. 2011. Lannan ja muun eloperäisen materiaalin käsittelyteknologiat. MTT Raportti 27. 66 s. *Linkki e-julkaisuun.*

Marttinen, S., Paavola, T., Ervasti, S., Salo, T., Kapuinen, P., Rintala, J., Vikman, M., Kapanen, A., Torniaainen, M., Maunuksela, L., Suominen, K., Sahlström, L. ja Herranen, M. 2013. Biokaasulaitosten lopputuotteet lannoitevalmisteina. MTT Raportti 82. 72 s. *Linkki e-julkaisuun.*

Marttinen, S., Suominen, K., Lehto, M., Jalava, T. ja Tampio, E. 2014. Haitallisten orgaanisten yhdisteiden ja lääkeaineiden esiintyminen biokaasulaitosten käsittelyjäännöksissä sekä niiden elintarvikeketjuun aiheuttaman vaaran arviointi. BIOSAFE-hankkeen loppuraportti. MTT Raportti 135. 89 s. *Linkki e-julkaisuun.*

ProAgria Keskusten Liitto (toim.). 2013. Puhdistamolietteen käyttö maataloudessa. 51 s. *Linkki e-julkaisuun.*

Tontti, T., Kapuinen, P., Ojajärvi, J., Joki-Tokola, E., Laurila, M., Ikäläinen, T., Kekkonen, J. ja Veijalainen, A-M. 2015. Orgaanisten lannoitevalmisteiden levittäminen, varastointi ja annostelu. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 26/2015. Luonnonvarakeskus. 79 s. *Linkki e-julkaisuun.*

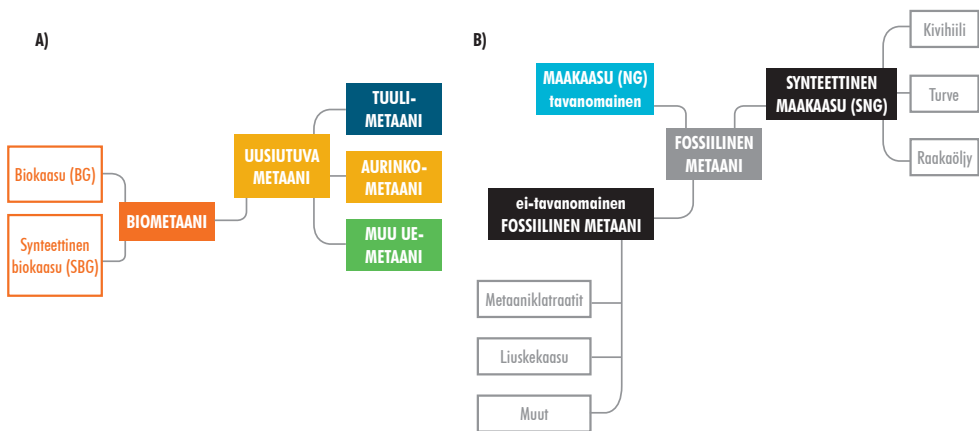
## 7. Biokaasun käsittely ja hyödyntäminen

Ari Lampinen (luvut 7.1 – 7.4 ja 7.7 – 7.11)

Ari Lampinen ja Erkki Rautio (luvut 7.5 ja 7.6)

### 7.1 Johdanto

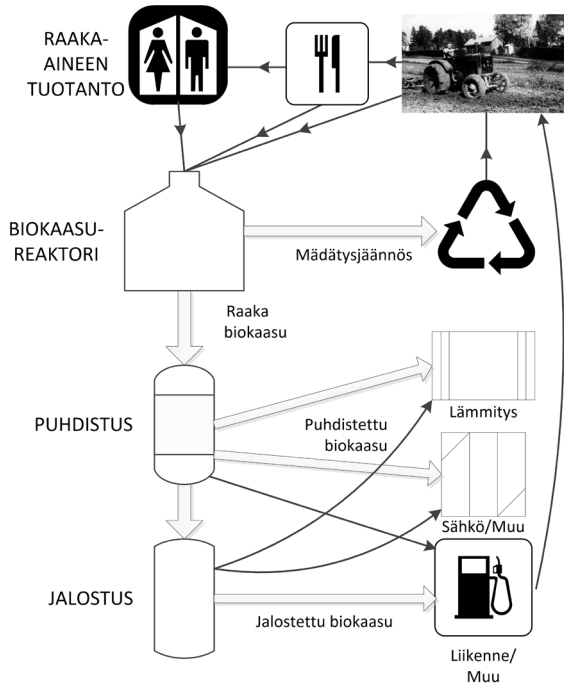
Tämän kirjan aiheena on biologisen anaerobisen prosessin (AD) kautta syntyvä biokaasu (BG), mutta tässä luvussa 7 esitettävistä asioista suuri osa soveltuu muillekin metaanilajeille (Kuvio 7.1). On olennaista huomata, että käsittelyprosessi on pääosin sama kaikille metaanilajeille ja hyödyntämisessä metaanin lähteellä ei ole merkitystä. Se tarkoittaa, että teknologiat soveltuvat kaikille. Tässä luvussa kuten koko kirjassa päähuomio on reaktorikaasussa, mutta myös kaatopaikkakaasu syntyy mätänemisen kautta. Synteettinen biokaasu (SBG) puolestaan valmistetaan termokemiallisten prosessien avulla (Luku 10). Biometaanin lisäksi käytetään myös muita uusiutuvia metaanilajeja (Luku 10) ja fossiilisia metaanilajeja tuotetaan monin tavoin. Metaanilajeilla on joitakin eroja käsittelyn yksityiskohdissa, mutta sitä ei tekstiin ole sisällytetty.



Kuvio 7.1 Uusiutuvan (A) ja fossiilisen (B) metaanin lajit (Lampinen 2012).

Kuvio 7.2 esittää yksinkertaistetusti biokaasun käsittelyprosessin. Puhdistuksessa raakakaasusta poistetaan epäpuhtauksia eli komponentteja, jotka vaurioittavat laitteita tai estävät niiden toiminnan ja/tai tuottavat ympäristöön haitallisia päästöjä. Jalostuksessa nostetaan jalostusarvoa vähentämällä hyödyntämisen kannalta tarpeettomia komponentteja, jot-

ka eivät kuitenkaan haittaa hyödyntämistä eivätkä ole ympäristölle haitallisia.



Kuvio 7.2 Biokaasun käsittely eri käyttökohteita varten. Tässä on esitetty AD-prosessissa syntyvä biokaasu, mutta käsittelyn yleinen kulku on kaikille metaanilajeille sama. Sähkön tuotantoon ja lämmitykseen käytetään yleensä puhdistettua kaasua, mutta voidaan käyttää myös jalostettua. Liikenne- ja työkonepolttoaine on yleensä jalostettua kaasua, mutta se voi olla pelkästään puhdistettua. Muu käyttö tarkoittaa materiaalina hyödyntämistä.

Kuvio 7.2 on laadittu reaktoribiokaasulle, mutta se on pääosin (puhdistus, jalostus ja hyödyntäminen) sama kaatopaikkakaasulle, kuten myös muille metaanilajeille. Kaikki moderni hyödyntäminen edellyttää puhdistusta. Jalostus ei teknisesti ole tarpeen missään energiasovelluksessa, mutta se helpottaa kaasun kuljettamista ajoneuvoissa ja verkoissa. Kuvio painottaa biokaasun suoraa energiahyödyntämistä, koska se on nykyään vallitsevassa asemassa. Mutta biokaasu soveltuu myös materiaalina monenlaisten tuotteiden valmistukseen. Tuotetun energian palautesilmukka on kuvassa annettu vain maatalouden traktorikäytölle johtuen sen suuresta potentiaalisesta merkityksestä sekä ruoan että muiden maatalouden tuotteiden ympäristövaikutusten pienentämisessä. Mutta sekä lämpöä, sähköä että liikennepolttoainetta hyödynnetään koko tuotantoketjussa. Esimerkiksi biokaasureaktorin lämmitys toteutetaan useimmiten biokaasulla.

Tässä luvussa esiteltävän käsittelyprosessin tarkoituksena ei ole tuottaa puhdasta metaania, koska energiantuotannon laitteet eivät sitä edellytä. Puhdasta metaania tarvitaan vain laboratorioissa ja eräissä teollisuuden prosesseissa. Energiantuotantoon käytetään sen sijaan metaanipolttoainetta eli kaasuseosta, jonka energiasisällöstä suurin osa on metaania, mutta joka sisältää myös muita energiakaasuja sekä inerttejä kaasuja. Monet näistä kaasuista ovat hyödyllisiä energiakäytössä, joten niitä ei haluta poistaa.

Puhdistus ja jalostus ovat periaatteessa aivan erilaisia prosesseja, vaikka teknisesti niitä voi yhdistää. Puhdistuksen tarkoituksena on epäpuhtauksien vähentäminen, jotta energiantuotantolaitteet ja jalostuslaitokset eivät vaurioidu ja jotta energiantuotannon päästöt pysyvät säädetyissä rajoissa. Jalostuksen tarkoituksena on kaasun energiatihedyn nostaminen varastointitilan tarpeen ja kuljetuksen energiankulutuksen pienentämiseksi. Jalostuksessa vähennetään inerttejä kaasuja (hiilidioksidi ja typpi-kaasu), jotka eivät ole epäpuhtauksia. On yleistä, että puhdistusta integroidaan jalostuksen kanssa energiankulutuksen ja hankintakustannusten minimoimiseksi silloin, kun se on mahdollista. Jalostettua kaasua voidaan jalostamoiden sijaan valmistaa myös tuotantoketjuun sisällytettyjen hiilidioksidia kuluttavien kemiallisten prosessien avulla. Esimerkiksi tuuli- ja biometaanin yhteistuotannossa biokaasun hiilidioksidista valmistetaan tuulimetaania antamalla sen reagoida tuulivedyn kanssa Sabatier-reaktorissa (Luku 10).

Epäpuhtauksien yhteenlaskettu osuus on raaka-assa kuivassa biokaasussa lähes aina alle yhden tilavuusprosentin, mutta joskus rikkivedyn pitoisuus voi olla sen yli. Erittäin korkeita epäpuhtauksien pitoisuuksia löytyy eräistä raakamaakaasuista, mutta ei raakabiokaasuista. Jalostuksessa erotettavien kaasujen, hiilidioksidin ja typen, pitoisuudet sen sijaan ovat kymmeniä prosentteja.

Raaka biokaasu ei kelpaa mihinkään moderniin hyötykäyttöön, mutta se voidaan polttaa hätätapauksissa. Sitä varten biokaasulaitoksilla on soihutupolttimet. Lämmitys ja sähköntuotanto eivät edellytä jalostusta, koska paikalliskäytössä varastointitila ei ole ongelma. Riittää, kun biokaasu puhdistetaan tasolle, jonka lämmitys- ja sähköntuotantolaitteiden valmistajat ovat määrittäneet. Liikenne- ja työkonepolttoainetta valmistettaessa kaasu yleensä jalostetaan, mutta se ei ole välttämätöntä. Lähinnä paikallisessa käytössä voidaan hyödyntää jalostamatonta biokaasua. Tällöin ajoneuvo on säädettävä erikseen, sillä kaikki tehdasvalmisteiset ajoneuvot sopivat sellaisenaan vain jalostetun kaasun käyttöön.

Taulukossa 7.1 annetaan yhteenveto biokaasun käyttömuotojen resurssitehokkuudesta. Energiatehokkuus mittaa biokaasusta saatavissa olevan hyödynnettävän energian määrää ja exergiatehokkuus biokaasun avulla tehtävissä olevan työn määrää. Kokonaishyötysuhde kertoo energiategokkuu-

desta ottaen huomioon tuotantolaitoksen ja siirron kulutuksen sekä siirron häviöt. Edellä mainitut ovat teknisiä, mutta jalostusarvo on teknis-taloudellinen mittari. Se kertoo kuinka suuri taloudellinen arvo biokaasukuutiosta valmistetulla tuotteella on. Ravinteiden kierrätyksen osalta resurssitehokkuus on korkea käyttömuodosta riippumatta.

Taulukko 7.1 Biokaasun pääkäyttömuotojen resurssitehokkuuden yhteenveto.

Käyttö	Kokonaishyöty-suhde loppukäyt-töön toimitetulle energialle	Energia-tehokkuus	Eergia-tehokkuus	Jalostusarvo
Lämpö	70 – 95 %	Korkea	Nolla	Alhainen
Sähkö	20 – 40 %	Keskinker-tainen	Korkea	Keskinkertainen
Liikenne	80 – 95 %	Korkea	Korkea	Korkea

## 7.2 Biokaasun koostumus ja ominaisuudet

Raa'an biokaasun ja kaatopaikkakaasun koostumus vaihtelee runsaasti (Taulukko 7.2). Koostumus on aina selvítettävä tapauskohtaisesti ennen puhdistus- ja jalostusteknologioiden valintaa ja sivutuotteiden erot-tamista. Kaatopaikkakaasussa ja jätevedenpuhdistamoista peräisin ole-vassa reaktorikaasussa on enemmän komponentteja kuin muissa raaka-biokaasulajeissa. Taulukossa on jalostetun biokaasun koostumuksesta esimerkkinä Ruotsin liikennebiokaasustandardin SS 155438:1999 vaa-timukset.

Raakakaasun komponenteista metaani ja vety ovat energiakaasuja ja hyödynnettävissä myös monenlaisissa kemianteollisuuden prosesseissa. Hiilidioksidi ja typpikaasu ovat inertejä komponentteja, jotka eivät sisällä energiaa, mutta jotka eivät myöskään haittaa energiakäyttöä. Niitä voidaan poistaa energiatihyden kasvattamiseksi ja/tai sivutuotteiksi. Muut komponentit ovat epäpuhtauksia. Vaikka osa niistä sisältää energiaa, ne halutaan poistaa laitteisto- ja päästöhaittojen vuoksi, ja niistäkin voidaan valmistaa sivutuotteita.

Taulukko 7.2 Raan biokaasun tyypillisiä koostumuksia (muokattu: Deublein & Steinhauser 2008, Welinger ym. 2013) sekä Ruotsin liikennebiokaasustandardin mukaisen jalostetun biokaasun koostumus.

Yhdiste	Raaka reaktorikaasu	Raaka kaatopaikkakaasu	Jalostettu biokaasu (SS 155438:1999)
Metaani (CH <sub>4</sub> ) [til-%]	45–75	20–60	95–99
Korkeammat hiilivedyt (etaani ym.)	0	0	0
Hiilidioksidi (CO <sub>2</sub> ) [til-%]	20–55	25–50	1–5
Typpi (N <sub>2</sub> ) [til-%]	0–2	4–35	0–4
Hiilimonoksidi (CO) [til-%]	0–0,2	0–0,2	
Happi (O <sub>2</sub> ) [til-%]	0–1	0,5–5	< 1
Vety (H <sub>2</sub> ) [til-%]	0–0,5	0–0,5	
Rikkivety (H <sub>2</sub> S) [til-%]	< 0,8	< 3	
Rikki yhteensä [mg (Nm <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup> ]	< 8000	< 30000	≤ 23
Ammoniakki (NH <sub>3</sub> ) [mg (Nm <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup> ]	0–3	0–1	< 20
Siloksaanit [mg (Nm <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup> ]	0–5	0–25	
Halogenoidut hiilivedyt [mg (Nm <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup> ]		0,2–7	
Vesi [mg (Nm <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup> ]			< 32
Suhteellinen kosteus [%]	100 %	< 100 %	kastepiste: käyttölämpötila - 5 °C

Taulukkoon 7.3 on koottu tietoja biokaasun energiakäyttöominaisuuksista. Wobbe-indeksi on energiavuon mittari, jota käytetään kaasuverkoissa. Puhdistettu biokaasu on oktaaniluvultaan jalostettua biokaasua parempaa, koska hiilidioksidi nostaa oktaanilukua. Samasta syystä jalostetun biokaasun oktaaniluku on korkeampi kuin jalostetulla maakaasulla.



Taulukko 7.3 Puhdistetun biokaasun ja kaatopaikkakaasun sekä jalostetun biokaasun ja maakaasun energiakäyttöominaisuuksia. Jalostettu biokaasu tarkoittaa Ruotsin standardin mukaista kaasua. Jalostettu maakaasu tarkoittaa Länsi-Euroopan metaaniverkkojen vaatimuksia.

Ominaisuus	Puhdistettu biokaasu	Puhdistettu kaatopaikkakaasu	Jalostettu biokaasu	Jalostettu maakaasu
Energiasisältö (alempi) [MJ (Nm <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup> ]	20–30	18–22	34–36	30,2–47,2
Wobbe-indeksi (alempi) [MJ (Nm <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup> ]			43,9–47,3	37,8–56,5
Oktaaniluku	150–160	140–150	130–140	120–130

Verrattuna nestemäisiin polttoaineisiin biokaasulla on muiden muassa seuraavia teknisiä etuja (muokattu: Lampinen 2012):

- ✓ Kaasumaisuuden takia sekoittuminen ilman kanssa on parempi, josta syystä polttoaineen energiasisältö hyödynnetään paremmin, epätäydellisestä palamisesta syntyvät päästöt ovat alemmat ja hyötysuhde sekä teho on mahdollista saada korkeammaksi. Nestemäisiä päästöjä ei ole lainkaan, joten maaperän pilaantumisen ja vesien saastumisen ongelmia ei synny.
- ✓ Yksihiilisyys, homogeenisyys ja pieni molekyylipaino johtavat alhaisiin päästöihin ja päästökomponenttien pieneen määrään. Raskaat päästökomponentit (kaikkein myrkyllisimmät) puuttuvat kokonaan ja hiukkaspäästöt ovat äärimmäisen alhaiset.
- ✓ Puhdistetun biokaasun komponentit (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> ja N<sub>2</sub>) ovat myrkyttömiä ja hajuttomia. Ne eivät heikennä ilman laatua eivätkä aiheuta happamoitumista ja rehevöitymistä. CH<sub>4</sub> ja CO<sub>2</sub> ovat kasvihuonekaasuja, mutta CO<sub>2</sub>:lla ei ole nettovaikutusta.
- ✓ Päästöjen tärkeimmän haitallisen komponentin typen oksidien (NOx) määrää on teknisesti mahdollista alentaa katalysaattorilla enemmän kuin nestemäisiä polttoaineita käytettäessä, koska voidaan keskittyä pelkistykseen. Biokaasu ei sisällä korkeampia hiilivetyjä ja metaania ei tarvitse hapettaa, koska se ei aiheuta ilmanlaatuongelmia. Mutta koska maakaasu sisältää korkeampia hiilivetyjä, niiden päästöt tulevat mukaan biokaasun käyttöön silloin, kun biokaasu siirretään maakaasuverkon kautta.
- ✓ Soveltuvuus kaikkiin voimanlähteisiin, mukaan lukien lämpövoimakoneet ja polttokennot. Liikenteessä soveltuu kaikkiin liikennemuotoihin ja kaikkiin ajoneuvotyypeihin.

- ✓ Korkeampi energiatiheys massayksikköä kohti. Korkeampi energiatiheys tilavuusyksikköä kohti olisi mahdollista toteuttaa, mutta nykyään sellaista teknologiaa ei markkinoilla ole. Nykyään energiatiheys tilavuusyksikköä kohti on alempi.
- ✓ Korkeampi oktaaniluku antaa mahdollisuuden korkeampaan moottorin hyötysuhteeseen ja tehoon.
- ✓ Paremmat kylmäkäyttöominaisuudet johtuen korkeasta höyrynpaineesta ja metaanin alhaisesta jäätymispisteestä (-180 °C).
- ✓ Paremmat turvallisuusominaisuudet johtuen keveydestä, korkeasta syttymispisteestä, korkeasta syttymisrajasta ja kapeasta syttymisalueesta.

Biokaasu soveltuu kaikkiin liikenteessä ja sähkön tuotannossa käytettäviin moottorityyppeihin, joista yleisimmät löytyvät Taulukosta 7.4.

Taulukko 7.4 Biokaasun soveltuminen yleisimpiin liikenteessä ja sähköntuotannossa käytettäviin moottorityyppeihin (muokattu: Lampinen 2012).

Moottorityyppi	Sovellukset
2-tahtimoottori	Mopot, moottorikelkat, moottoripyörät, muut kevytajoneuvot
Ottomoottori	Kevytajoneuvot, henkilöautot, pakettiautot, kuorma-autot, linja-autot, veturit, raitiovaunut, veneet, lentokoneet, työkoneet, sähköntuotanto
Wankelmoottori	Henkilöautot, moottoripyörät
Dieselmoottori	Henkilöautot, pakettiautot, kuorma-autot, linja-autot, veturit, veneet, laivat, työkoneet, sähköntuotanto
Stirlingmoottori	Sukellusveneet, sähköntuotanto
Kaasuturbiini	Linja-autot, veturit, laivat, helikopterit, lentokoneet, sähköntuotanto
Suihkumoottori	Lentokoneet
Höyryturbiini	Laivat, sähköntuotanto
Rakettimoottori	Avaruusalukset
Polttokenno	Veturit, laivat, sähköntuotanto
Sähkömoottorihybridi	Henkilöautot, pakettiautot, linja-autot

### 7.3 Puhdistus ja jälkikäsittely

Sekä puhdistuksessa että jälkikäsittelyssä vähennetään haitallisia päästöjä ympäristöön. Puhdistuksessa vähennetään lisäksi raakakaasun komponentteja, jotka vaurioittavat laitteita tai estävät niiden toimintaa.

Raakaa biokaasua ei teollisuusmaissa polteta kuin poikkeustilanteissa; kehitysmaiden yksinkertaisia järjestelmiä alla oleva ei koske.

### 7.3.1 Puhdistus

Sekä lämmitykseen, sähkön tuotantoon, liikennepolttoainetuotantoon että muihin tarkoituksiin käytettävä biokaasu on aina normaalitoiminnassa puhdistettava. Puhdistus kohdistuu epäpuhtauksiin (Taulukko 7.5). Puhdistus ei kohdistu inertteihin kaasuihin (kuten CO<sub>2</sub> ja N<sub>2</sub>), koska ne eivät ole epäpuhtauksia eli eivät aiheuta energian tuotantolaitteissa ongelmia eivätkä tuota haitallisia päästöjä. Siksi mikään käyttömuoto ei edellytä niiden poistamista.

Taulukko 7.5 Biokaasun epäpuhtaudet, niiden aiheuttamat ongelmat ja niiden puhdistusmenetelmiä. Taulukko muokattu lähteistä: Deublein & Steinhauser, 2008 ja Wellinger ym., 2013.

Epäpuhtaus	Laitehaittoja	Päästöhaittoja	Puhdistusmenetelmiä
Vesihöyry	Syöpyminen, tukkiutuminen		adsorptio (silikageeli ym.), absorptio (glykoli ym.), jäädytys, paineistus
Rikkiyhdisteet	Syöpyminen	Happamoituminen, myrkyllisyys, haju	biologinen, absorptio (vesi), adsorptio (rauta, aktiivihili), kemiallinen
Halogenoidut hiilivedyt	Syöpyminen	Happamoituminen, myrkyllisyys	adsorptio, absorptio, jäädytys
Ammoniakki		Myrkyllisyys, rehevöityminen	absorptio (vesi), adsorptio
Siloksaanit	Karstoittuminen		fysikaalinen adsorptio (aktiivihili, silikageeli ym.), kemiallinen adsorptio, jäädytys, absorptio (vesi, orgaaniset nesteet)
Hiukkaset	Karstoittuminen		absorptio, suodatus, sykloni
Happi	Räjähdyks		adsorptio, kemiallinen

Puhdistusprosessi kohdistuu aina vähintään vesihöyryyn (kaasun kuivaus) ja rikkivetyyn, koska niitä on aina raakakaasussa ja ne muodostavat yhdessä rikkihappoa. Yksinkertaisimmillaan puhdistusjärjestelmä koostuu silikageeliadsorptioyksiköstä kuivaukseen ja biologisesta rikkivedyn pelkistämisestä biokaasureaktorissa. Muita epäpuhtauksia poistetaan tarvittaessa. Yleensä puhdistuksessa erotetaan selvästi alle 1 % kuivan raakakaasun tilavuudesta. Rikkiyhdisteitä, varsinkin rikkivetyä

(H<sub>2</sub>S), raakakaasussa on aina mukana. Joissakin reaktorikaasuissa ja kaatopaikkakaasuissa niitä voi olla jopa useita prosentteja, mutta ei koskaan kymmeniä prosentteja kuten raakamaakaasussa voi olla (Taulukko 7.7). Joissakin raakakaasuissa (lähinnä kaatopaikkakaasussa ja jätevesilietettä mädättävien reaktorien kaasuissa) voi olla niin suuria määriä muita epäpuhtauksia, että ne täytyy sisällyttää puhdistukseen (Taulukko 7.2). Näitä ovat yleisimmin ammoniakki, siloksaanit (Kuva 7.1), halogenoitut hiilivedyt ja hiukkaset.



Kuva 7.1 Kemialliseen adsorptioon perustuva siloksaanien puhdistusyksikkö Ämmässuon kaatopaikalla Espoossa. Kuva: Ari Lamminen

Puhdistusprosessi on aina suunniteltava tapauskohtaisesti perustuen raakakaasun koostumukseen (Taulukko 7.2) ja laitevalmistajien laatuvaatimuksiin (Taulukot 7.6 ja 7.11). Toisaalta puhdistusvaatimukset otetaan huomioon käyttölaitteiden sekä jalostusteknologian valinnassa ja biokaasulaitoksen syötevalinnoissa. Puhdistusprosessia ei yleensä toteuteta yksittäisellä puhdistuslaitoksella, vaan se hajautetaan eri osiin tuotanto- ja käsittelyketjua. Osa puhdistuksesta toteutetaan erillisillä yksiköillä: vesihöyry aina ja usein myös rikkivety. Mutta osa integroidaan muihin järjestelmiin: yleisintä on toteuttaa rikin puhdistus biologisella pelkistyksellä jo biokaasureaktorin yläosassa, ja lisäpuhdistus tehdään erillisyyksiköillä tarpeen vaatiessa. Mikäli käsittelyjärjestelmään sisältyy jalostamo, se on myös osa puhdistusjärjestelmää, koska kaikki jalostusteknologiat vaikuttavat myös epäpuhtauksiin. Toisaalta jalostamoiden vaatimukset sisään tulevalle kaasulle voivat lisätä puhdistuksen tarvetta.

Puhdistusteknologiat ovat jalostusteknologioita huomattavasti monimuotoisempi ja laajempi alue, joten sitä ei voida tässä yleisoppikirjassa kattaa. Asiasta kiinnostunutta lukijaa kehoitetaan tutustumaan alan erikoisteoksiin (kuten Kohl & Nielsen 1997) ja biokaasualan laajempiin yleisteoksiin (kuten Deublein & Steinhauser 2008). Perustietoa on kuitenkin saatavissa luvusta 7.4., koska monet puhdistusteknologiat soveltavat samoja toimintaperiaatteita kuin jalostusteknologiat.

Taulukko 7.6 Eräiden laitevalmistajien laatuvaatimuksia erityyppisille sähköntuotannossa tai liikenne-energian tuotannossa käytettäville voimanlähteille. Taulukko muokattu lähteestä: Arnold, 2009.

Voimanlähte/ tyyppi	Otto- ja diesel- moottori/ICE	Kaasu- turbiini/ICT	Mikro- turbiini/ICT	Polttokeho (SOFC)/FC	Strirling- moottori/ECE*)
Rikki [ppm CH <sub>4</sub> ]	545–1742	< 10 000	25–70 000	< 1	280
Pii [ppm CH <sub>4</sub> ]	9–44	0,087	< 0,01	< 0,01	0,42
Halogenit [ppm CH <sub>4</sub> ]	60–491	1 500	200	< 5	232

\*) Koska stirling-moottori on ECE-moottori sen polttoprosessi on tarvittaessa suunniteltavissa hyvin suurille epäpuhtauspitoisuuksille.

### 7.3.2 Jälkikäsittely ja poikkeustilanteet

Jälkikäsittelyllä tarkoitetaan tässä puhdistuksen ja jalostuksen jälkeen ilmakehään johdettavan kaasun käsittelyä, ei energiakäytön jälkeistä savukaasujen käsittelyä. Mikäli ilmakehään johdettava kaasu sisältää liikaa haitallisia komponentteja, niitä hävitetään esimerkiksi polttamalla ja termisillä, katalyyttisillä ja biologisilla hapetus- ja pelkistysreaktioilla. Se on harvoin tarpeen, mutta voi tulla kyseeseen varsinkin rikkivedylle sen hajuhaittojen ja myrkyllisyyden takia suurissa laitoksissa, joihin syötetään erityisen rikkipitoisia raaka-aineita.

Jalostamoista ilmakehään johdettava kaasu sisältää aina myös metaania, koska mikään jalostusteknologia ei täysin pysty sitä erottamaan. Metaani on voimakas kasvihuonekaasu, mutta se ei aiheuta muita ympäristöhaittoja. Moderneissa laitoksissa metaanipäästöt ovat erittäin alhaiset, joten jälkikäsittelyn tarvetta ei niissä ole.

Mutta poikkeustilanteisiin varautumisessa metaanipäästöt ovat päähuolenaihe. Koska biokaasun tuotanto on jatkuvaa, mutta kulutus ei ole, biokaasun varastointi on välttämätöntä. Kuitenkin kaikilla laitoksilla on varauduttava tilanteeseen, jossa varastointikapasiteetti täyttyy. Tällöin kaasua ei sellaisenaan saa päästää ilmakehään metaanin kasvihuonekaasuvaikutuksen takia, vaan metaani on poltettava eli kaasu on soihdutettava. Soihdu on tästä syystä pakollinen laite kaikissa biokaasulaitoksissa (Kuva 7.2).



Kuva 7.2 Soihuja Joensuun kaatopaikalla (a) ja jätevedenpuhdistamolla (b). Kuvat: Ari Lampinen

## 7.4 Jalostus

Biokaasun ja muiden metaanipolttoaineiden jalostuksen tarkoituksena on kaasun energiasisällön kasvattaminen vähentämällä inerttien kaasujen määrää. Tässä käsitellään erillisiä jalostuslaitoksia, mutta ne eivät ole välttämättömiä, koska jalostus voidaan eräissä tapauksissa integroida muuhun tuotantoprosessiin. Jalostuksen kohteena on aina hiilidioksidi ( $\text{CO}_2$ ) ja joskus lisäksi typpikaasu ( $\text{N}_2$ ). Argonin (Ar) määrä on aina niin pieni, että sitä ei tarvitse vähentää, mutta mikäli typpi poistetaan kryojalostuksella, se vaikuttaa myös argoniin. Inerttejä kaasuja ei koskaan energiakäyttöä varten yritetä kokonaan poistaa, koska ne eivät ole moottoreiden toimintaa haittaavia epäpuhtauksia. Lisäksi hiilidioksidi parantaa kaasun moottoritekniestä laatua nostamalla oktaanilukua.

Jalostuksen tarkoituksena ei ole kaasun puhdistaminen epäpuhtauksista, mutta osa jalostusteknologioista vähentää myös epäpuhtauksia. Esimerkiksi yleisin jalostusteknologia vesipesu on samalla erittäin tehokas rikkivedyn puhdistusteknologia. Toisaalta jalostamoihin menevä kaasu täytyy puhdistaa jalostamovalmistajien antamien laatuvaatimusten mukaisesti, joten puhdistusvaatimukset voivat nousta. Esimerkiksi aktiivihiiliadsorptio edellyttää erityisen alhaista rikkivedyn pitoisuutta.

Taulukossa 7.7 vertaillaan raakakaasujen koostumuksia jalostuksen ( $\text{CO}_2$  ja  $\text{N}_2$ ) ja puhdistuksen ( $\text{H}_2\text{S}$ ) kannalta tärkeimpien yhdisteiden suhteen. Raaka biokaasu on raakaa kaatopaikkakaasua laadullisesti parempaa eli sekä jalostuksen että puhdistuksen vaatimukset ovat pienemmät. Raan maakaasun koostumukset vaihtelevat niitä enemmän. Se tarkoittaa, että pahimmillaan puhdistus ja jalostus ovat maakaasulle paljon vaativampia kuin kaatopaikkakaasulle.

Taulukko 7.7 Biokaasun ja maakaasun koostumuksen vertailu (% tarkoittaa tilavuusprosenttia). Jalostettu kaasu tarkoittaa EU:n raskaan liikenteen metaanimootoreiden tyypikatsastusvaatimuksia. Muihin tarkoituksiin jalostusvaatimukset voivat poiketa paljonkin.

	Raaka biokaasu	Raaka kaato-paikkakaasu	Raaka maakaasu	Jalostettu bio- ja maakaasu
Metaani (CH <sub>4</sub> )	45–75 %	20–55 %	44–98 %	> 84 %
Hiilidioksidi (CO <sub>2</sub> )	20–55 %	25–50 %	0–54 %	< 16 %
Typpi (N <sub>2</sub> )	0–5 %	10–25 %	0,2–26 %	< 16 %
Rikkivety (H <sub>2</sub> S)	< 0,8 %	< 3 %	0–36 %	< 0,003 %

Taulukon 7.7 mukaisesti 84 % on jalostetun biokaasun metaanipitoisuuden vähimmäisvaatimus liikenne- ja työkonekäytössä silloin, kun käytetään tehdasvalmisteisia ajoneuvoja ilman konversioita. Se on seurausta EU:n raskaiden liikenteen metaanimootoreiden tyypikatsastuslainsäädännöstä. Kevyet liikennemetaanimootorit, joita henkilö- ja pakettiautoissa käytetään, edellyttävät yleensä jalostetulta biokaasulta vähintään 90 %:n metaanipitoisuutta. Kaikki liikennemetaanimootorit toimivat, kun biokaasun metaanipitoisuus on vähintään 95 %, joka on Ruotsin liikennebiokaasustandardin SS 155438:1999 mukainen vaatimus. Nämä vaatimukset koskevat tehdasvalmisteisia ajoneuvoja ja työkoneita. Ajoneuvot voidaan kuitenkin säätää siten, että jalostusta ei tarvita.

Silloin, kun jalostus tehdään muuta tarkoitusta varten, vaatimukset voivat olla paljon pienemmät. Jalostusta vaaditaan sähkön tuotantoa varten ainoastaan silloin, kun metaanipitoisuus alittaa 20 %, mikä on mahdollista kaatopaikkakaasulle. Se on minimi parhaille kaatopaikkakaasumootoreille, jotka ovat stirling-mootoreita. Otto-mootorit vaativat yleensä vähintään 40 %:n metaanipitoisuuden, mutta parhaimmat toimivat jo 30 % pitoisuudessa.

Jalostusteknologioista ensimmäiset olivat kryojalostus, joka otettiin käyttöön 1920-luvulla alun perin synteettisen maakaasun (SNG) jalostukseen, sekä vesipesu, joka otettiin käyttöön 1930-luvulla alun perin biokaasun jalostukseen (Lampinen 2013). Vesipesu soveltuu vain hiilidioksidin vähentämiseen, mutta kryojalostus myös typpikaasun vähentämiseen.

Kaupalliset jalostusteknologiat jaetaan seuraaviin ryhmiin käytettävien prosessien perusteella:

- ✓ Fysikaalinen absorptio (vesipesu, kemikaalipesu ym.): perustuu hiilidioksidin liukoisuuteen; vesipesu käytössä 1930-luvulta alkaen ja kemikaalipesu 1980-luvulta alkaen
- ✓ Kemiallinen absorptio (amiinipesu ym.): perustuu hiilidioksidin kemiallisiin reaktioihin, käytössä 2000-luvulta alkaen
- ✓ Fysikaalinen adsorptio (aktiivihiili, molekyyliseula ym.): perustuu molekyylien kokoeroihin, käytössä 1980-luvulta alkaen
- ✓ Kryojalostus: perustuu kiehumis- ja sulamispisteiden eroihin, käytössä 1920-luvulta alkaen
- ✓ Kalvojalostus: perustuu molekyylien kokoeroihin, käytössä 1970-luvulta alkaen

Demonstraatiokäytössä on muitakin teknologioita, esimerkiksi hiilidioksidin kemiallisiin reaktioihin entsyymien katalysoimana perustuva biologinen jalostus.

Kaupallisten teknologioiden tärkeimpiä ominaisuuksia on koottu taulukoon 7.8. Kaikki soveltuvat hiilidioksidin vähentämiseen, mutta vain kryojalostus, kalvojalostus ja molekyyliseula-adsorptio typpikaasun vähentämiseen.

Ympäristönsuojelun kannalta metaanivuotojen alhaisuus on tärkein valintaperuste, koska metaani on 20 – 70 kertaa hiilidioksidia voimakkaampi kasvihuonekaasu. Mikäli metaanivuoto on yli 10 %, tuotetun biokaasun elinkaaren kasvihuonekaasupäästöt ylittävät bensiinin ja dieselin päästöt. Fossiilisten metaanilajien (Kuvio 7.1) elinkaaripäästöt vaihtelevat erittäin paljon. Se tarkoittaa, että niistä parhaimpiin verrattuna jo 6 % metaanivuoto voi johtaa korkeampiin elinkaaripäästöihin, mutta niistä huonoimpiin verrattuna edes yli 90 % metaanihävikillä biokaasun elinkaaripäästöt eivät ole korkeammat.

Metaanivuoto ei ole sama asia kuin metaanihävikki, joka tarkoittaa jalostusyksikön läpi pääsevää metaania. Amiinipesua ja kryojalostusta lukuun ottamatta jalostusyksiköiden läpi voi päästä merkittävä osuus metaanista, mutta sitä hyödynnetään kierrättämällä uudelleen jalostusyksikköön tai kytkemällä useampia jalostusyksiköitä peräkkäin. Tarvittaessa sitä hävitetään jälkikäsittelyssä. Joissakin maissa metaanivuodoille on asetettu yläraja, joka yleensä on 1 %, mutta voi olla alempikin. Erityisen alhaisista metaanipäästöistä myönnetään myös tukimekanismeissa huomioon otettavia teknologiabonusia.



Taulukko 7.8 Kaupallisten jalostusteknologioiden vertailua. Normikuutiot [Nm<sup>3</sup>] tarkoittavat raaka-kaasukuutioita normaalipaineessa ja 0 °C lämpötilassa. Taulukko muokattu lähteistä: Petersson & Wellinger, 2009 ja Bauer ym., 2013.

	Vesipesu	Kemikaalipesu	Amiinipesu	Adsorptio	Kryo	Kalvo
Metaanihävikki	< 8 %	< 4 %	< 0,1 %	< 23 %	< 0,5 %	< 25 %
Metaanivuoto (tyypillinen)	< 1 %	< 1 %	< 0,1 %	< 1 %	< 0,1 %	< 0,5 %
Sähkönkulutus [kWh (Nm <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup> ] (tyypillinen sulkeissa)	0,21–0,30 (0,24)	0,10–0,28 (0,21)	0,10–0,15 (0,12)	0,2–0,3 (0,25)	0,25	0,2–0,3 (0,23)
Lämmönkulutus [kWh (Nm <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup> ]			0,13			
Lämpötilavaatimus [°C]	1–20	55–80	120–160		< -80	
CH <sub>4</sub> -pitoisuus, jos ei N <sub>2</sub> (tyypillinen sulkeissa)	> 97 % (98 %)	> 96 % (98 %)	> 99 % (99,8 %)	> 96 % (98 %)	> 99 % (100 %)	> 96 % (98 %)
CH <sub>4</sub> -pitoisuus, jos 20 % N <sub>2</sub> (tyypillinen sulkeissa)	78 %	78 %	80 %	< 94 %	99 %	< 94 %
Esipuhdistus-tarve	Ei	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä
N <sub>2</sub> :n erotusmahdollisuus	Ei	Ei	Ei	Kyllä	Kyllä	Kyllä
Kapasiteetti [Nm <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> ]	> 5	> 100	> 100	> 5	> 100	> 5

Lähtökohtaisesti laitoksen metaanihävikin pienuus osoittaa ympäristönsuojelullisen paremmuuden. Varsinkin varhaisissa kalvo-, adsorptio- ja vesipesujalostamoissa esiintyi hyvin korkeita metaanihävikkejä ja myös metaanivuotoja. Vaikka moderneissa laitoksissa ei sellaisia yleensä enää ole, riskin olemassaolo on sisällytetty Taulukkoon 7.8. Syynä on se, että nämä kolme teknologiaa ovat usein uusien jalostamovalmistajien suosiossa, koska niiden avulla voidaan rakentaa pieniä jalostamoita.

Ympäristönsuojelumielessä paras jalostusteknologia on amiinipesu silloin, kun raakakaasussa ei ole paljon tyyppiä (eli tavanomaisissa reaktori-

kaasuissa). Se valitaan silloin, kun polttoaineen elinkaaren kasvihuonekaasupäästöjen minimointi priorisoidaan. Koska kyseinen tavoite on tärkeää poliittisille päätöksentekijöille Saksassa ja Ruotsissa, niissä maissa tämän teknologian käyttö kasvaa jalostusteknologioista voimakkaimmin. Amiinipesulla on myös alhaisin sähkön tarve ja se tarjoaa yhdessä kryojalostuksen kannalta laadullisesti korkeatasoisimman lopputuotteen. Silloin kun raakakaasussa on paljon typpeä, mikä on mahdollista vain kaato-paikkakaasulle, paras teknologia sekä ympäristönsuojelumielessä että jalostetun kaasun laadun kannalta on kryojalostus. Pieneen kokoluokkaan sekä amiinipesu että kryojalostus soveltuvat huonosti, joten niissä toteutuksissa vesipesu, aktiivihiiliadsorptio ja kalvojalostus hallitsevat. Kemi-kaalipesun rooli on nykyään pienenevään päin.

Suomen ensimmäinen biokaasujalostamo otettiin käyttöön Kalmarin maatilalla Laukaassa vuonna 2002. Taulukko 7.9 sisältää yleistiedot Suomessa vuoden 2014 lopussa toiminnassa olleesta yhdeksästä kaupallisesta jalostamosta sekä jalostetun kaasun kuljetustavoista. Yhteenlaskettu jalostuskapasiteetti eli sisään tulevan puhdistetun kaasun enimmäismäärä normaalikuutiolina tunnissa on  $2731 \text{ Nm}^3 \text{ h}^{-1}$  ja jalostetun biokaasun tuotantokapasiteetti on  $16 \text{ MW}_{\text{pa}}$ . Koko EU:ssa tuotantokapasiteetti on yli 100-kertainen.

Taulukko 7.9 Suomen biokaasujalostamot vuoden 2014 lopussa. Taulukko muokattu lähteestä: Lampinen 2014.

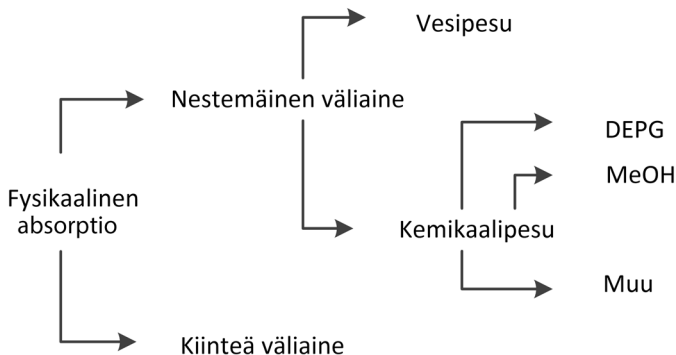
Käyttöön	Jalostamon sijainti	Operaattori	Jalostusteknologia	Valmistaja	Kaasun kuljetus
2002	Kalmarin maatilan biokaasulaitos Laukaassa	Kalmarin maatila	Vesipesu	Metener, Suomi	Biokaasuputki
2011	Kouvolan Veden jätevedenpuhdistamo	KSS Energia	Vesipesu	Greenlane, Uusi-Seelanti	Metaaniverkko
2012	Haapajärven ammattioiston (HAI) biokaasulaitos	HAI/ MetaEnergia	Vesipesu	MetaEnergia, Suomi	Biokaasuputki
2012	HSY:n jätevedenpuhdistamo Espoossa	Gasum	Vesipesu	Malmberg, Ruotsi	Metaaniverkko
2013	Envor Biotechin biokaasulaitos Forsassa	Envor Biotech	Kalvo	Envor, Suomi	Biokaasuputki
2014	Joutsan Ekokaasun biokaasulaitos Joutsassa	Joutsan Ekokaasu	Vesipesu	Metener, Suomi	Biokaasuputki

2014	Jepuan Biokaasun biokaasulaitos	Jepuan Bio-kaasu	Vesipesu	Malmberg, Ruotsi	Maantie ja biokaasuputki
2014	Labion biokaasulaitos PHJ:n jätekeskuksessa Lahdessa	Gasum	Vesipesu	Malmberg, Ruotsi	Metaaniverkko
2014	Kalmarin maatilan biokaasulaitos Laukaassa	Kalmarin maatiila	Vesipesu	Metener, Suomi	Biokaasuputki

Alaluvuissa käsitellään kaupallisia jalostusteknologioita yleisellä tasolla. Teknisiä yksityiskohtia on saatavissa esimerkiksi Peterssonin ja Wellingerin (2009) sekä Bauerin ym. (2013) julkaisuista ja niiden lähdeviitteistä sekä valmistajilta. Monenlaiset teknologiat ovat jo osoittautuneet kaupallisesti kilpailukykyisiksi, mutta mahdollisuuksia on muitakin. Biologista jalostusta ja muita demonstraatio- tai tutkimusvaiheessa olevia teknologioita ei alla käsitellä, mutta niistä voi tulla tulevaisuudessa kaupallisesti merkittäviä.

#### 7.4.1 Fysikaalinen absorptio

Fysikaalinen absorptio tarkoittaa kaasun sitoutumista nestemäiseen tai kiinteään väliaineeseen (Kuvio 7.3). Sitouttaminen nestemäiseen väliaineeseen tarkoittaa liukenemistä. Se on kaupallista teknologiaa hiilidioksidin vähentämiseen, mutta ei typen vähentämiseen. Absorptio kiinteään väliaineeseen ei ole kaupallista teknologiaa.



Kuvio 7.3 Fysikaalisen absorption vaihtoehdot. (MeOH = metanoli, DEPG = Dimethyl Ether of Polyethylene Glycol)

### 7.4.1.1 Vesipesu

Vesipesu on ensimmäinen biokaasun jalostusmenetelmä ja ollut käytössä 1930-luvulta alkaen. Se on edelleen tärkein menetelmä. Vesipesun menestykselle on monta syytä:

- ✓ Periaatteessa erittäin yksinkertainen menetelmä ja käytännössäkin kohtalaisen yksinkertainen.
- ✓ Ei tarvitse käsitellä kemikaaleja.
- ✓ Soveltuu kaikkiin kokoluokkiin alkaen hajautetuista pienistä maatilakokoluokan laitoksista suurimpiin keskitettyihin laitoksiin.
- ✓ Kohtalaisen edullinen, erityisesti jätevedenpuhdistamoille, koska absorptioon käytettävää vettä ei tarvitse puhdistaa, vaan puhdistettu jätevesi voidaan kierrättää absorptio-asteenä ennen sen päästämistä vesistöön.
- ✓ Toimii myös puhdistusmenetelmänä monille yhdisteille, erityisesti rikkivedylle, joka on biokaasun tärkein epäpuhtaus.
- ✓ Ei aseta puhdistusvaatimuksia raakakaasulle.
- ✓ Metaanin ja hiilidioksidin välinen liukoisuusero on suurempi kuin useimmilla kemikaalipesussa käytetyillä nesteillä.
- ✓ Käyttökulut ovat yleensä alhaiset (mutta ne voivat nousta korkeiksi kylmissä olosuhteissa veden lämmitystarpeen vuoksi ja lämpimissä olosuhteissa veden viilennystarpeen vuoksi).

Vesipesu perustuu hiilidioksidin suurempaan vesiliukoisuuteen metaaniin verrattuna. Henryn laki määrittää kaasun liukoisuuden veteen seuraavasti:

$$c_a = k_H \cdot p_g, \quad \text{Y7.1}$$

missä  $c_a$  = konsentraatio vedessä [mol litra<sup>-1</sup>],  $k_H$  = Henryn lain vakio [mol litra<sup>-1</sup> · atm<sup>-1</sup>] ja  $p_g$  = kaasun osapaine [atm]. Henryn lain vakio riippuu kaasusta, lämpötilasta ja paineesta. Mitä pienempi Henryn lain vakio kaasulle on, sitä huonommin se liukenee veteen. Taulukossa 7.10 annetaan Henryn lain vakiot eräille kaasuille vedessä 25 °C lämpötilassa ja 1 ilmakehän paineessa. Lämpötilan noustessa liukoisuus yleensä alenee. Paineen nostaminen lisää liukoisuutta.

Taulukko 7.10 Henryn lain vakio  $k_H$  [mol (litra atm)<sup>-1</sup>] eräille kaasuille vedessä 25 °C lämpötilassa ja 1 ilmakehän paineessa.

Kaasu	$k_H$
Ammoniaki (NH <sub>3</sub> )	60
Metyylimerkaptaani (CH <sub>3</sub> SH)	0,4
Rikkivety (H <sub>2</sub> S)	0,1
Hiilidioksidi (CO <sub>2</sub> )	0,035
Metaani (CH <sub>4</sub> )	0,0014
Happi (O <sub>2</sub> )	0,0013
Hiilimonoksidi (CO)	0,00095
Vety (H <sub>2</sub> )	0,00078
Typpi (N <sub>2</sub> )	0,00061

Hiilidioksidin liukoisuus on noin 25-kertainen metaaniin verrattuna, joten vesipesun avulla metaanipitoisuutta voidaan nostaa. Mutta liukoisuusero ei ole suuri, mikä tarkoittaa, että myös metaania liukenee. Laitteisto täytyy suunnitella siten, että metaanihävikki ei ole liian suuri. Se rajoittaa metaanipitoisuuden ylärajaa. Typen vesiliukoisuus on alhainen, joten vesipesu ei kelpaa sen vähentämiseen.

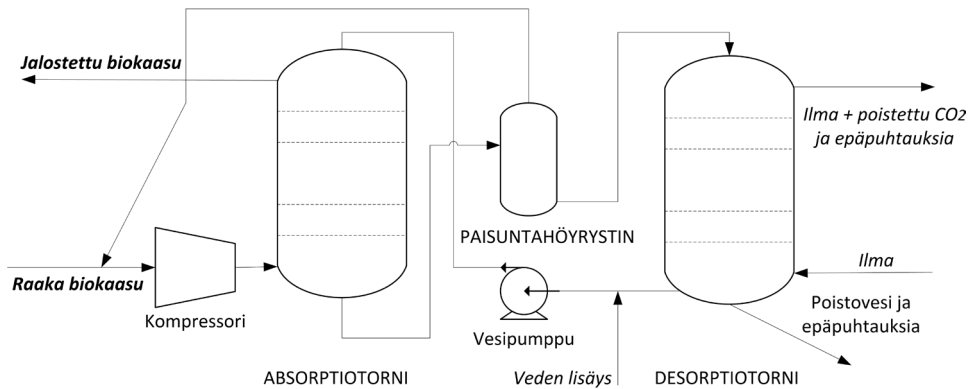
Epäpuhtauksista vesipesu poistaa ammoniakkin ja rikkivetyyhdisteet, joiden vesiliukoisuus on paljon suurempi kuin hiilidioksidin. Siloksaanien välillä on erittäin suuret liukoisuuserot. Joitakin niistä voidaan poistaa vesipesulla, mutta osaa ei. Koska vesipesulla voidaan puhdistaa monia epäpuhtauksia, poistuva kaasu on hiilidioksidin jatkokäytön kautta liikaista. Jos hiilidioksidia halutaan tuottaa jalostuksessa sivutuotteena, on valittava muu prosessi kuin vesipesu. Mutta rikin tehokkaan puhdistuksen takia alkuainerikkiä voidaan valmistaa sivutuotteena.

Suomen neljä ensimmäistä biokaasujalostamo perustuvat vesipesuun. Kuvassa 7.3 on Suomen toinen jalostamo, joka sijaitsee Kouvolan jätevedenpuhdistamolla. Se on valmistettu Uudessa-Seelannissa ja perustuu siellä jo 1970-luvun lopussa käyttöön otettuun teknologiaan (Lampinen 2013). Laitteisto mahtuu pieneen standardikonttiin lukuun ottamatta absorptio- ja desorptiotorneja. Absorptio tapahtuu absorptiotornissa ja suljetussa kierrossa käytetty vesi puhdistetaan desorptiotornissa. Desorptiotornia ei välttämättä tarvittaisi, koska puhdistettu jätevesi voitaisiin kierrättää absorptiotornin kautta ennen sen laskemista vesistöön. Sitä käytetään, koska useimmilta laiteomittajilta on saatavissa vain desorptiotornilla varustettuja jalostamoita.



Kuva 7.3 KSS Energian omistama ja operoima Greenlane-vesipesujalostamo Kouvolan jätevedenpuhdistamolla. Jalostuskapasiteetti on  $300 \text{ Nm}^3 \text{ h}^{-1}$ . Kuva: Ari Lampinen

Vesipesun toimintadiagrammi esitetään kuviossa 7.4. Raakabiokaasu paineistetaan (yleensä 6–10 bar, mutta joissakin laitoksissa jopa 150 bar, jolloin tornien korkeus alentuu merkittävästi) ja syötetään absorptiotorniin, jossa hiilidioksidi, osa metaanista ja monet epäpuhtaudet liukenevat alaspäin virtaavaan veteen. Jalostettu biokaasu poistuu absorptiotornin yläosasta. Koska hiilidioksidin ja metaanin vesiliukoisuudet ovat kohtalaisen lähellä toisiaan, puhdistusvesi sisältää absorptiotornista poistuessaan paljon metaania, tyypillisesti noin 4–6 % biokaasun metaanista. Niin paljon ei saa kestävyysyistä päästää ilmakehään. Siksi kaikki kaupalliset vesipesujalostamot sisältävät paisuntahöyrystimen, johon absorptiotornin läpäissyt vesi johdetaan. Paisuntahöyrystimessä paine alenee nopeasti, jolloin veden sisältämä metaani suurelta osin poistuu. Se johdetaan uudelleen kompressorin kautta absorptiotorniin. Kiertävä vesi puhdistetaan desorptiotornissa, jossa se laskeutuu vasten ylösnousevaa ilmaa, ja ohjataan sen jälkeen uudestaan absorptiotorniin. Osa vedestä korvataan uudella vedellä siihen liuenneiden epäpuhtauksien poistamiseksi. Hiilidioksidi ja monet epäpuhtaudet poistuvat ilman mukana. Mikäli haitallisia epäpuhtauksia, lähinnä rikkivetyä, on liian paljon ympäristöluvan mukaiseen tasoon verrattuna, poistokaasua on vielä käsiteltävä ennen sen päästämistä ilmakehään. Molemmat tornit on pakattu täyteen pakkausmateriaalia kaasun ja nesteen kontaktipinnan maksimoimiseksi. Tämä materiaali likaantuu ja täytyy manuaalisesti aika ajoin vaihtaa.



Kuvio 7.4 Vesipesujalostamon toimintadiagrammi. Vesipesu eroaa kaikista muista jalostusmenetelmistä siinä, että siihen voi syöttää raakaa biokaasua. Kaikki muut jalostamotyypit edellyttävät puhdistettua biokaasua.

#### 7.4.1.2 Kemikaalipesu

Kemikaalipesu on muuten samanlainen prosessi kuin vesipesu, mutta absorboiva neste on jokin muu kuin vesi. Tämä neste valitaan siten, että hiilidioksidin liukoisuus siihen on paljon parempi kuin veteen. Toivottava piirre olisi, että Henryn lain vakion ero hiilidioksidin ja metaanin välillä olisi suurempi kuin vedellä, mutta käytännössä lähes kaikki käytetyt nesteet ovat tässä suhteessa vettä huonompia. Siksi paisuntahöyrystintä on pakko käyttää kuten vesipesussa.

Parempaan hiilidioksidin liukoisuuden takia kemikaalipesun laitteisto on pienempi kuin vesipesuun tarvittava: erityisesti absorptio- ja desorptiotornit ovat paljon pienemmät. Se tarkoittaa, että kemikaalipesujalostamo on vesipesujalostamoon verrattuna hankintahinnaltaan halvempi ja sen sähkönkulutus on alempi. Kääntöpuolena ovat kemikaalien käsittely, niiden päästöt ja niiden hankinnan kustannukset. Prosessi on samanlainen kuin vesipesussa (Kuvio 7.4), mutta lisäksi pesukemikaali on lämmitettävä ennen desorptiota ja viilennettävä ennen absorptiota. Näistä syistä tämä teknologia ei sovellu pieneen kokoluokkaan. Ulkoisesti kemikaalipesujalostamot näyttävät samanlaisilta kuin vesipesujalostamot, mutta samankokoisessa laitoksessa niillä on suurempi jalostuskapasiteetti.

Kemikaalipesussa liukenevat myös rikkiyhdisteet ja monet puut epäpuhtaudet kuten vesipesussa. Siksi vesipesujalostamoiden lailla myös kemikaalipesujalostamoista poistuvasta kaasusta voidaan valmistaa sivutuotteenä alkuainerikkiä, mutta ei hiilidioksidia.

Tarkoitukseen käytettävät pesukemikaalit ovat sekoituksia, joilla on kaupalliset tuotenimet. Genosorp<sup>®</sup>, Selexol<sup>®</sup> ja Coastal AGR<sup>®</sup> ovat eniten

käytettyjä absorptioneiteita. Niiden pääkomponentit ovat polyetyyleeniglykolin dimetyylieettereitä (DEPG). Genosorp voi sisältää myös muita polyetyleeniglykoli-dialkyyli-eettereitä. Rectisol® ja Krysol® ovat pääasias-  
sa metanoliin perustuvia absorptioneiteita. Purisol® perustuu N-metyyli-2-pyrrolidoniin (NMP) ja Jeffsol® propyleenikarbonaattiin (PC), mutta niitä ei toistaiseksi ole käytetty biokaasun jalostuksessa (mutta kylläkin maakaasun jalostuksessa). Suuri määrä muitakin kemikaaleja sopisi jalostukseen, mutta vain edellä mainitut ovat nykyään kaupallisessa käytössä.

Typen vähentämiseen eivät edellä mainitut kaupalliset absorptioneiteet sovellu, kuten ei vesikään. PC on hiilidioksidin ja metaanin liukoisuuseron suhteen vettä vastaava, mutta muut edellä mainitut nesteet ovat vettä huonompia. Sen seurauksena metaanihävikki on tyypillisesti biokaasun kemikaalipesujalostamoissa korkeampi ja saavutettava metaanipitoisuus alhaisempi kuin vesipesujalostamoissa (Taulukko 7.8). Näistä syistä kemikaalipesun käyttö on laskusuunnassa. Esimerkiksi Ruotsissa sitä aiemmin käytettiin, mutta ei enää. Mahdolliset uudet pesukemikaalit saattavat muuttaa tilanteen tulevaisuudessa.

#### 7.4.2 Kemiallinen absorptio

Kemiallinen absorptio tarkoittaa hiilidioksidin vähentämistä kemiallisten reaktioiden kautta. Se voidaan tehdä joko kaasu- tai nestefaasissa. Kaasufaasissa toimivia jalostamoita ei ole toiminnassa, mutta Sabatier-reaktorien avulla biokaasua jalostetaan kaupallisesti tuulimetaanin tuotantoprosessin sisäisesti. Kaikki kemialliseen absorptioon perustuvat kaupalliset jalostuslaitokset toimivat nestefaasissa. Niissä toteutetaan fysikaalinen absorptio kuten kemikaalipesussa, mutta pääprosessina ovat kemialliset hiilidioksidia kuluttavat reaktiot.

Kaikki nykyään kaupallisesti käytettävät absorptioneiteet ovat amiineja, josta syystä prosessia kutsutaan usein amiinipesuksi. Yleisimmin käytetyt amiinit ovat monoetanoliamiini (MEA), dietanoliamiini (DEA) ja metyyli-dietanoliamiini (MDEA). Absorptioneite on yhden tai useamman amiinin vesiliuos. Tulevaisuudessa muitakin nesteitä saatetaan ottaa kaupalliseen käyttöön.

Amiinipesu on ympäristönsuojelun kannalta paras jalostusteknologia, koska metaanihävikki on pienin (Taulukko 7.8). Siitä syystä se on eniten kasvava teknologia Ruotsissa ja Saksassa. Sen sähkönkulutus on myös pienin kaikista teknologioista, mutta lämmönkulutus suurin. Se tarjoaa laadullisesti korkeimman jalostustason eli korkeimman metaanipitoisuuden silloin, kun typpeä ei raakakaasussa ole, mutta typpeä se ei pysty vähentämään. Se on teknisesti varsin vaativa prosessi, joten se soveltuu vain suureen kokoluokkaan.



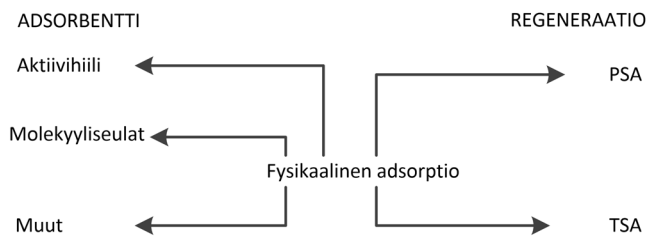
Amiinipesulaitokset näyttävät ulkoisesti samanlaisilta kuin vesipesulaitokset (Kuva 7.4). Johtuen absorptiotornissa tapahtuvasta tehokkaasta hiilidioksidin poistosta paisuntahöyrystintä ei tarvita. Toisaalta desorptio eli amiiniliuoksen regenerointi on vaativampi prosessi kuin vesi- ja kemikaalipesussa.



Kuva 7.4 Amiinipesulaitos Göteborgissa: jalostuskapasiteetti on  $1600 \text{ Nm}^3 \text{ h}^{-1}$ . Kuva: Ari Lampinen.

### 7.4.3 Fysikaalinen adsorptio

Fysikaalinen adsorptio tarkoittaa kaasukomponenttien poistoa kiinteän huokoisen väliaineen, adsorbentin, avulla. Nesteitä ei tässä menetelmässä tarvita. Fysikaalisen adsorption vaihtoehdot on esitetty Kuviossa 7.5.



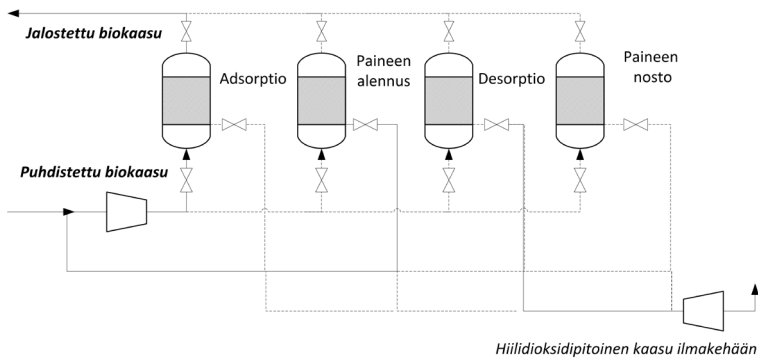
Kuvio 7.5 Fysikaalisen adsorption vaihtoehdot. (PSA=Pressure Swing Adsorption, TSA=Temperature Swing Adsorption)

Adsorptiossa kaasumolekyylit kiinnittyvät huokoisen kiinteän aineen pintaan, kuitenkin reagoimatta kemiallisesti, lämpöä vapauttaen. Vaihtoehdot eroavat adsorbentin ja sen regeneraation (eli adsorbentin puhdistusmekanismin) osalta.

Selvästi yleisin adsorbentti biokaasun jalostuksessa on aktiivihiili. Muita vaihtoehtoja ovat zeoliitit, silikonigeelit, MOFit (Metal-organic framework) ja molekyylliseulat. Molekyylliseulat ovat varta vasten tiettyjen yhdisteiden erottamiseen valmistettuja suuren erotustarkkuuden adsorbentteja, jotka useimmiten ovat synteettisiä zeoliittejä, mutta nanoteknologia mahdollistaa muidenkin materiaalien käytön. Ne sopivat rajoitetusti myös tyyppien erottamisen, kun muut adsorbentit soveltuvat vain hiilidioksidin erottamiseen. Koska molekyylien koot ovat lähellä toisiaan, ja menevät osin päällekkäin, kaikkea tyyppiä ei saada erotettua, vaan sitä jää kaupallisissa laitoksissa ainakin 4 %:n osuus jalostettuun kaasuun.

Adsorbenttipedit voidaan regeneroida joko painevaihteluiden avulla (PSA = Pressure Swing Adsorption) tai lämpötilavaihteluiden avulla (TSA = Temperature Swing Adsorption). Biokaasun jalostuksessa TSA:ta ei käytetä, mutta sitä hyödynnetään biokaasun puhdistuksessa, erityisesti veden poistamisessa. Koska nykyään jalostuksessa käytetään vain PSA-tekniikkaa, adsorptioprosessia kutsutaan usein PSA:ksi.

PSA-regenerointia käyttävän adsorptioprosessin yksinkertaistettu prosessikaavio on Kuviossa 7.6. Adsorptioprosessi edellyttää biokaasun puhdistamista rikkivedystä ja vesihöyrystä. Puhdistettu biokaasu syötetään paineistettuna yhteen adsorptioastiaan, joka sisältää aktiivihiiltä tai muuta adsorbenttia. Samanaikaisesti yhtä tai useampaa adsorptioastiaa regeneroidaan. Useimmiten käytetään neljää astiaa (Kuva 7.5), joista yhdessä absorboidaan ja muissa regeneroidaan Charles Skarstromin vuonna 1960 patentoiman ja hänen nimeään kantavan syklin mukaisesti. Desorptio tehdään alentamalla painetta useammassa vaiheessa ja huuhtomalla hiilidioksidipitoinen kaasu pois. Metaanihävikkiä pienennetään kierrättämällä ensimmäisen regeneraatiovaiheen jälkeinen kaasu uudestaan sisään järjestelmään eli menetellään samoin kuin käytettäessä paisuntahöyrystintä fysikaalisessa absorptiossa.



Kuvio 7.6 Hiilidioksidin fysikaalisen adsorption prosessikaavio käytettäessä neljän astian PSA-regeneraatiota.

Reaktioastioiden ei tarvitse olla korkeita torneja kuten absorptiossa. Siksi adsorptiolaitokset poikkeavat ulkoisesti absorptiolaitoksista (Kuva 7.5).

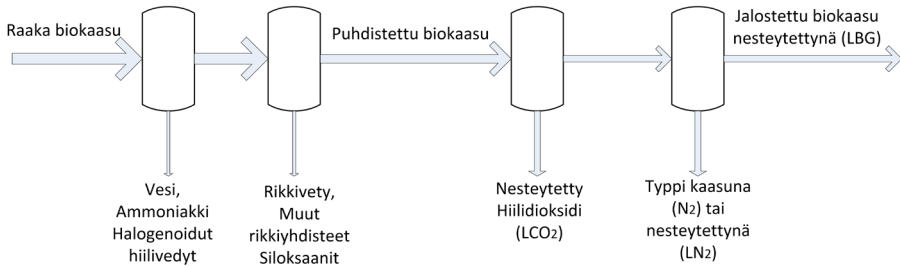


Kuva 7.5 Ulko- ja sisäkuva Kompogasin aktiivihiili-PSA-tekniikkaan perustuvasta adsorptiojalostamosta Otelfingenissä Sveitsissä. Jalostuskapasiteetti on  $50 \text{ Nm}^3 \text{ h}^{-1}$ . Jalostamorakennuksessa on korkeapaineinen kaasuväkä ja sen ulkopuolella tankkauspaikka. Jalostamon takana näkyy biokaasulaitos. Kuvat: Ari Lampinen

#### 7.4.4 Kryojalostus

Kryojalostus oli ensimmäinen käyttöön otettu metaanipolttoaineiden jalostusmenetelmä jo 1920-luvulla (Lampinen 2013). Ensin sitä käytettiin synteettisen maakaasun (SNG) ja sen jälkeen maakaasun (NG) jalostukseen. Biokaasun jalostukseen tämä teknologia tuli vasta 2000-luvulla johtuen sen teknisestä vaativuudesta ja vaikeuksista sovittaa se kustannustehokkaasti pieneen kokoluokkaan.

Kryojalostus on kuitenkin periaatteessa paras jalostusmenetelmä ja käytännössäkin se on paras typen erottamisessa ja yhdessä amiinipe-sun kanssa parhaita hiilidioksidin erottamisessa ja metaanivävikin minimoinnissa (Taulukko 7.8). Se on ainut menetelmä, jolla runsaasti typpeä sisältävästä kaatopaikkakaasusta voidaan jalostaa erittäin korkean metaanipitoisuuden polttoainetta. Käytännössä Ruotsin liikennebiokaasustandardin metaaniminimi 95 % on saavutettavissa kaatopaikkakaasulla vain kryojalostuksen avulla, mutta muillakin typen erotusmenetelmillä (molekyyliseula-adsorptiolla ja kalvoilla) saavutetaan liikenne-moottorien tyyppikatsastuksen vaatimus 84 % (Taulukko 7.7). Kuvio 7.7 esittää hollantilaisen GtS:n kryojalostuksen ja kryopuhdistuksen yksinkertaistettua prosessikaaviota.



Kuvio 7.7 Kryopuhdistuksen ja kryojalostuksen yksinkertaistettu prosessikaavio (Kättström 2009).

Kryojalostus perustuu olomuotojen erotteluun kuten tavanomainen tislauus, mutta ei pelkästään nesteiden ja kaasujen, vaan myös kiinteiden aineiden. Typpi ja metaani erotetaan jäädyttämällä kaasuseos alle metaanin kiehumispisteen (normaalipaineessa  $-161,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), jolloin metaani saadaan nesteytettynä biokaasuna (LBG). Sitä ennen erotetaan hiilidioksidi, joka ei nesteydy normaalipaineessa, mutta nesteytyy esimerkiksi 6 barin paineessa  $-57\text{ }^{\circ}\text{C}$ :n lämpötilassa. Jos sitä ei poisteta nesteytettynä, se jäätyy normaalipaineessa  $-78\text{ }^{\circ}\text{C}$ :n lämpötilassa. Lähes kaikki epäpuhtaudet on poistettava ennen sitä, koska ne jäätyvät vielä alemmissa lämpötiloissa ja ilman niiden poistamista putkistot tukkeutuvat. Tästä syystä kryojalostus vaatii puhdistukselta enemmän kuin muut jalostusmenetelmät ja samasta syystä se myös tuottaa puhtaampia sivutuotteita, kuten  $\text{LCO}_2$ , kuin muut jalostusmenetelmät. Koska jäädyttämisen avulla monia epäpuhtauksia voidaan poistaa, puhdistus integroidaan osaksi kryoprosessia, jossa jäädyttämisen lisäksi tehdään muitakin puhdistustoimenpiteitä riippuen raakakaasun laadusta. Epäpuhtaudet, joiden kiehumispiste on metaania alempi, poistuvat metaanin nesteytyksen yhteydessä typen kanssa. Mikäli nestemäistä typpeä halutaan sivutuotteena, kyseiset epäpuhtaudet poistuvat ilmakehään typen nesteytyksen yhteydessä.

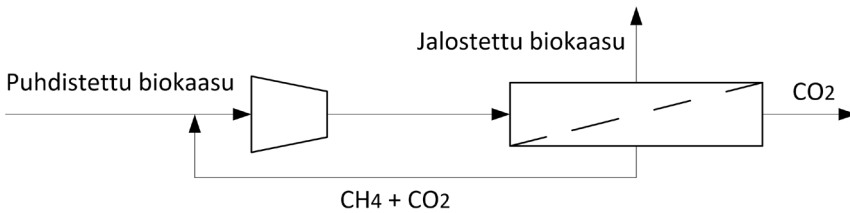


Kuva 7.6 GTS:n kryojalostamo Haarlemissa Hollannissa. Se jalostaa sekä kaatopaikkakaasua että jätevedenpuhdistamon reaktorikaasua. Jalostuskapasiteetti on  $280\text{ Nm}^3\text{ h}^{-1}$ . Kuva: Ari Lampinen

Hollanti on kryojalostuksen johtava maa. Kuvassa 7.6 on GtS:n valmistama jalostamo Haarlemissa. Sivutuotteena saatava nesteytetty hiilidioksidi on arvokas tuote, jolla on monia teollisia sovelluksia. Esimerkiksi Ruotsissa sitä käytetään kylmäkuljetusautojen jäähdytysaineena ja tankataan samoista paikoista kuin näiden autojen polttoaine. Tällöin ei tarvita dieselöljykäyttöisiä kompressoreita.

#### 7.4.5 Kalvojalostus

Kalvojalostus perustuu kaasujen erottamiseen niiden molekyylien koon perusteella. Koska metaani ja hiilidioksidi ovat lähes samankokoisia, niiden erottaminen ei ole helppoa. Käytännössä se tehdään ohjaamalla kaasu useamman kuin yhden kalvoerottimen läpi. Mikäli niin ei tehdä, metaanihävikki voi olla suurempi kuin millään muulla jalostusmenetelmällä (Taulukko 7.8). Tämä on yksinkertaistetussa prosessikaaviossa (Kuvio 7.8) kuvattu ohjaamalla kalvon läpäissyt kaasu uudestaan samaan kalvoon, mutta todellisissa toteutuksissa kalvoja on useita peräkkäin.



Kuvio 7.8 Kalvojalostuksen yksinkertaistettu prosessikaavio jalostettaessa puhdistettua biokaasua, jossa ei ole merkittävä määrä typpeä.

Hiilidioksidimolekyyli on hieman metaanimolekyyliä pienempi, joten se läpäisee tarkoitusta varten valitun kalvon paremmin kuin metaani ja typpi. Mikäli typen erotus on tarpeen, se voidaan tehdä toisella kalvolla seuraavassa vaiheessa. Typen ja metaanin erottaminen on vaikeampaa kuin metaanin ja hiilidioksidin, joten typpeä käytännössä jää jalostettuun biokaasuun vähintään muutama tilavuusprosentti (Taulukko 7.8). Kuvassa 7.7 on yksityiskohta Envor Biotechin kalvojalostamosta Forssassa. Kalvojalostamo on mahdollista rakentaa hyvinkin pienessä kokoluokassa.



Kuva 7.7 Kalvo Envor Biotechin kalvojalostamossa Forssassa. Jalostuskapasiteetti on  $16 \text{ Nm}^3 \text{ h}^{-1}$ .  
Kuva: Ari Lampinen

## 7.5 Biokaasun käyttö lämmityksessä

Lämmitys on biokaasun ensimmäinen ja yksinkertaisin hyödyntämistapa, jolla on useiden tuhansien vuosien historia. Se voidaan toteuttaa joko keskitetyllä tai laitekohtaisella järjestelmällä. Keskitetyssä järjestelmässä lämpö tuotetaan kattilassa ja siirretään väliaineen avulla loppukulutukseen. Väliaine on useimmiten vesi, mutta voi olla myös höyry, ilma tai erilaisia tarkoituksia (kuten talviolosuhteet) varten valmistettu lämmönsiirtoneste. Laitekohtaisissa järjestelmissä siirretään lämmön sijaan biokaasu, joka poltetaan loppukulutuslaitteessa. Teollisuusmaissa keskitetyt järjestelmät ovat hallitsevia, mutta kehitysmaissa laitekohtainen käyttö on yleisempää. Lämmityslaitteiden kokoluokka vaihtelee välillä  $1 \text{ kW}_{\text{th}} - 100 \text{ MW}_{\text{th}}$ . Korkeimmillaan loppukulutusenergian tuotannon hyötysuhde on 95 %, mikä on saavutettavissa laitekohtaisissa ja rakennuskohtaisissa järjestelmissä. Alimmillaan suurissa kaukolämpöverkoissa ja höyryn siirtoverkoissa voidaan jäää 70 %:n hyötysuhteeseen johtuen siirron lämpöhäviöistä.

Lämpökattilat tuottavat useimmiten keskuslämpöä (Kuva 7.8a) tai kaukolämpöä pääsovelluksena tilalämmitys, mutta myös teollisuuden prosessilämpöä (Kuva 7.8b). Muihin sovelluksiin lukeutuvat veden lämmitys, viljan ja muiden tuotteiden kuivaus sekä veden puhdistus. Kattilapoltoissa noin 75 – 85 % biokaasun sisältämästä energiasta voidaan hyödyntää lämpönä, mutta biokaasun potentiaali työn tekoon eli sen exergiasisältö menetetään. Siis vaikka energiahyötysuhde on korkea, exergiahyötysuhde on nolla. Kattilapoltoon soveltuu myös verraten heikkolaatuinen biokaasu, hätätapauksissa jopa puhdistamaton, mutta laitteiden kestävyyyden takia vesihöyry ja ainakin osa rikistä normaalisti poistetaan. Polttimista on saatavissa korkea rikkipitoisuutta kestäviä malleja, jolloin erilliseltä rikin puhdistamiselta vältytään eli biologinen pelkistys reaktorissa riittää.



Kuva 7.8 Biokaasukäyttöisiä kattiloita: a) Kaksi 90 kW, lämpökattilaa ammattiopisto Lappian Tervolan yksikön keskuslämmitysjärjestelmässä. b) 1,4 MW:n kattila teollisen prosessi-lämmön tuotantoon. Kuvat: Ari Lampinen

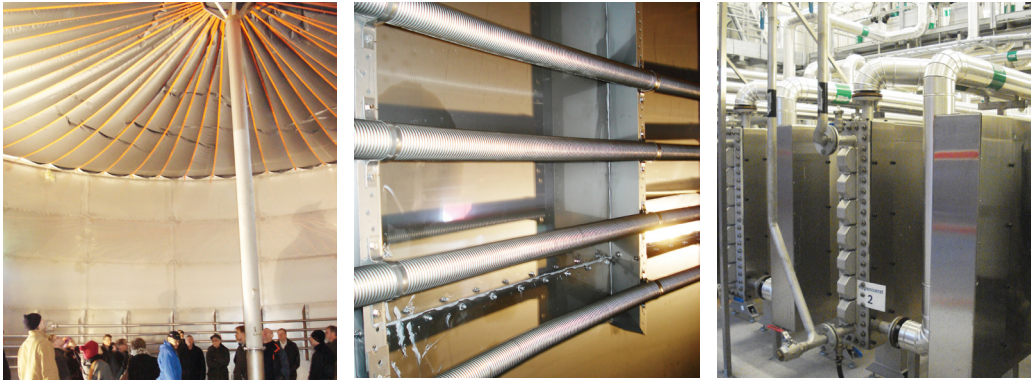
Laitekohtaisista lämmityssovelluksista yleisin on kehitysmaissa kotitalous- ja kyläkokuoloan reaktoreiden kaasua polttava keitin (Kuva 7.9a). Niitä on käytössä yli 100 miljoonaa, joten ne ovat selvästi yleisin biokaasun hyödyntämislaite globaalisti. Muita esimerkkejä ovat lämmittimet, liedet (Kuva 7.9b), uunit ja grillit.



Kuva 7.9 Laitekohtaisia biokaasun lämmityskäytön teknologioita: a) Biokaasun keitinkäyttöä Nepalissa kotitalouskokuoloan reaktorin yhteydessä. b) Biokaasuliiesi Haminan Energian paikallisessa metaanijakeluverkossa. Kuvat: Ari Lampinen

Lämpöä tuotetaan paitsi erillisesti myös CHP-järjestelmissä (Combined Heat and Power) yhdessä sähkön kanssa eli hyödynnetään sähköntuotannon hukkalämpöä (Luku 7.6). Tällöin lämpö pyritään hyödyntämään matalan lämpötilavaatimuksen sovelluksissa, sillä lämmön talteenotto korkeassa lämpötilassa alentaa sähköntuotannon hyötysuhdetta.

Biokaasulaitoksen lämmön tarve (Kuva 7.10), kuten reaktoreiden lämmitys ja hygienisointi, toteutetaan usein biokaasulla joko erillistuotantona tai CHP:nä. Se tuo laitoksiin lämpökuorman, joka helpottaa CHP-sähköntuotannon investointia, mutta vähentää myytävän energian määrää. Resurssitehokkuussyistä eräissä maissa biokaasulaitosten lämmitystarvetta pyritään kattamaan tarkoitukseen paremmin soveltuvalla aurinko- ja puuenergialla, jolloin kaikki tuotettu biokaasu voidaan myydä lämmitystä arvokkaampiin tarkoituksiin. Saksassa sellaisille toteutuksille myönnetään tukijärjestelmissä hyödynnettäviä teknologiabonusia.



Kuva 7.10 Biokaasureaktorin lämmitysputkistoa Biokympin laitoksella Kiteellä (vasemmalla ja keskellä) ja hygienisointiyksikön lämmönvaihtimia NSR:n biokaasulaitoksella Helsingborgissa (oikealla). Kuvat: Ari Lampinen

## 7.6 Biokaasun käyttö sähkön tuotannossa

Metaanipolttoaineilla voidaan tuottaa sähköä kokoluokassa  $1 \text{ kW}_e - 1000 \text{ MW}_e$ . Kaikki lämpövoimakonetypit ja useat muut voimanlähteet soveltuvat tarkoitukseen, mutta vain osaa niistä hyödynnetään kaupallisesti. Monia tyyppejä löytyy myös Suomen markkinoilta, mutta otto-mootoreilla on ollut hallitseva asema siitä alkaen kun biokaasusähkön tuotanto Suomessa vuonna 1936 aloitettiin. Taulukossa 7.11 hyötysuhde tarkoittaa tuotantolaitteen hyötysuhdetta. Loppukulutukseen toimitetun sähkön kokonaishyötysuhde on noin 10 % alempi johtuen voimalan omakulutuksesta, siirron kulutuksesta sekä siirron häviöistä. Biokaasun tuotannossa käytettävien resurssien hajautetusta luonteesta seuraa, että biokaasuvoimalaitosten tehot ovat yleensä välillä  $30 \text{ kW}_e - 30 \text{ MW}_e$ , tuotantolaitteiden hyötysuhteet välillä 25–45 % ja loppukulutukseen saadaan sähköä 20 %–40 % hyötysuhteella. Voimanlähteiden vaatimukset raakakaasun puhdistukselle (Taulukot 7.6 ja 7.11) vaihtelevat voimakkaasti. Jalostusta ei mikään voimanlähde edellytä, vaan kaikki toimivat sekä puhdistetulla reaktori- että kaatopaikkakaasulla. Kuitenkaan kaikki niistä eivät toimi sellaisilla kaatopaikkakaasuilla, joiden metaanipitoisuus on alle 40 %.



Taulukko 7.11 Metaanipolttoaineiden sähköntuotantolaitteet. Hyötysuhde tarkoittaa tuotantolaitteen hyötysuhdetta lauhdetuotannossa.

Tyyppi	Kuvaus	Lajeja	Teho [kWe]	Hyötysuhde $\eta_e$ (HHV)	Metaani-pitoisuus	Puhdistus-vaatimus
ICE	Mäntämoottori: poltto sisäisesti	otto, diesel	3-100 000	10-45 %	> 30 %	keskin-kertainen
ICT	Turbiini: poltto sisäisesti	kaasuturbiini, mikroturbiini	30-300 000	20-35 %	> 30 %	korkea
ECE	Mäntämoottori: poltto ulkoisesti	stirling	1-300	15-50 %	> 20 %	alhainen
ECT	Turbiini: poltto ulkoisesti	höyryturbiini, ORC-turbiini	40-1 000 000	10-40 %	> 20 %	alhainen
FC	Polttokenno: sähkökemiallinen	SOFC, MCFC	1-10 000	25-60 %	> 40 %	erittäin korkea
CC	Kombivoimala: hukkalämpö	ICE/ICT/FC + ECT/ECE	1 000-1 000 000	50-70 %		

Sähköntuotannon hyötysuhde on korkeimmillaan lauhdetuotannossa. Tällöin myös sähköstä saatava hinta on maksimoitavissa, koska se voidaan myydä korkean markkinahinnan aikoina eli kulutushuippuina. Sen mahdollistaa biokaasun varastoitavuus.

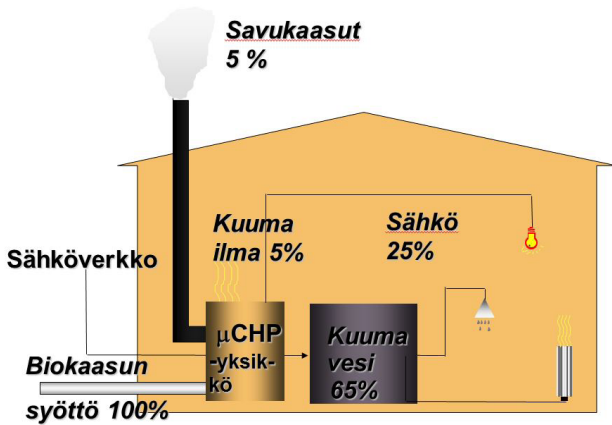
Yhdistetyssä sähkön ja lämmön tuotantolaitoksessa (CHP-voimalassa) sähköntuotannon hyötysuhde alentuu, koska lämpövoimakoneiden hyötysuhde riippuu lämpötilaerosta. Suurissa CHP-voimaloissa sähköntuotannon hyötysuhde voi pudota 10 – 20 %-yksikköä, koska lämpö otetaan talteen suuria kaukolämpöverkkoja varten korkeassa ja teollisuushöyryn tapauksessa erittäin korkeassa lämpötilassa pienentäen merkittävästi lämpövoimakoneiden toimintalämpötilaeroa. Tyypillisissä biokaasulaitosten CHP-sovelluksissa sähköntuotannon hyötysuhde ei lauhdetuotantoon verrattuna alene lainkaan tai alenee korkeintaan 5 %-yksikköä, koska niissä ei yleensä ole tehokkaita lauhduttimia. Lämpöä voidaan ottaa talteen sähkögeneraattoria pyörittävien moottorien jäähdytysjärjestelmistä ja pakokaasuista lämmönvaihtimien avulla.

Kokonaishyötysuhde on CHP-tuotannossa selvästi lauhdetuotantoa korkeampi. Se on kaukolämpöjärjestelmissä välillä 55–80 % ja rakennuskohtaisissa jopa 95 %. Biokaasulaitoksissa lämpöä tarvitaan reaktorin lämmittämiseen, joten niissä sähkön tuotanto toteutetaan lähes aina CHP-tekniikalla. Vaikka loppukulutukseen saatava lämpö reaktorin tarpeen verran vähenee ja loppuenergian tuotannon hyötysuhde alenee noin 10 %-yksikköä, sähkön tuotantomäärään vaikutus on vähäinen tai olematon. Mutta lämpökuorman alhaisuus voi vaikuttaa sähkön tuotantomäärään erittäin merkittävästi. CHP-laitoksissa sähkön tuotanto on yleensä sidottu lämmön kulutukseen ja koska biokaasulaitokset sijaitsevat usein kaukana asutuksesta ja kaukolämpöverkoista, lämmölle ei aina löydy riittävästi kulu-tusta. Se tarkoittaa, että myös sähkön tuotantoa joudutaan alentamaan ja jopa soihduttamaan biokaasua.

### 7.6.1 ECE- ja ECT-lämpövoimakoneet sekä kombivoimalat

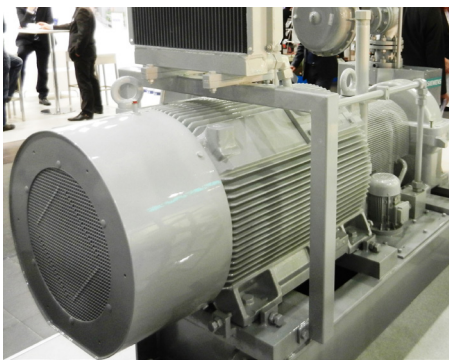
Väliaineiden avulla lämmitettävät mäntämoottorit (ECE, external combustion engine, esimerkiksi stirling-moottori) ja turbiinit (ECT, external combustion turbine, esimerkiksi ORC-turbiini) mahdollistavat biokaasun polton täydellisen hallinnan, koska se tehdään sylinterin tai turbiinin ulkopuolella. Siksi se on toteutettavissa huonolaatuisimmillakin kaasuilla. Ne toimivat myös hukkalämmöllä, joten niiden avulla voidaan toteuttaa kombivoimaloita (CC, combined cycle). Kombivoimaloissa lämpövoimakoneen tai polttokennon hukkalämpö hyödynnetään lisäsähkön tuotantoon.

Stirling-moottorit ovat teknisesti parhaiten biokaasusähkön tuotantoon soveltuva teknologia, koska ne sopivat pienimpään kokoluokkaan, edellyttävät vähiten kaasun puhdistusta, toimivat alhaisimmilla metaanipitoisuuksilla ja tarjoavat kaikista lämpövoimakoneista korkeimman hyötysuhteen. Ne soveltuvat myös rakennuskohtaiseen mikro-CHP-tuotantoon, jolloin on saavutettavissa jopa 95 % kokonaishyötysuhde (Kuva 7.11). Koska niiden melutaso on kaikista lämpövoimakoneista alhaisin, ne soveltuvat myös asumalähiöihin. Stirling-moottorit ovat kuitenkin harvinaisia joihtuen otto-moottoreita korkeammista investointikustannuksista, varsinkin haluttaessa korkeaa hyötysuhdetta. Stirling-moottorin teoreettinen hyötysuhde on korkeampi kuin minkään muun lämpövoimakoneen ja myös kaupallisissa toteutuksissa niillä saavutetaan korkein hyötysuhde, korkeampi kuin diesel-moottoreilla. Se on kuitenkin teknisesti vaikeaa, joten sellaisten käyttö on toistaiseksi rajoittunut erikoissovelluksiin (kuten sukellusveneet). Edullisimmissa stirling-moottoreissa hyötysuhde on niihin verrattuna vain puolet tai alempi.

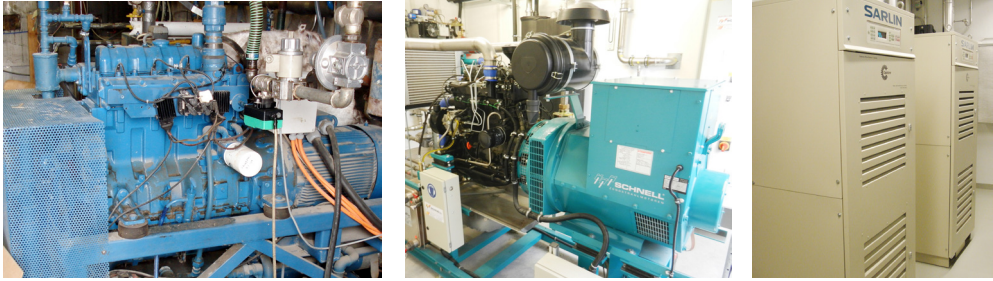


Kuva 7.11 Rakennuskohtainen biokaasukäyttöinen stirling- $\mu$ CHP-järjestelmä: a) Periaate (Lampinen 2002), b) Toteutus (8 kW<sub>e</sub>, 24 kW<sub>t</sub>) Plönningessä Ruotsissa. Kuva: Ari Lampinen

Höyryturbiineilla tuotetaan puolet maailman sähköstä, yleensä suuressa kokoluokassa, mutta niitä on saatavissa myös pienessä kokoluokassa biokaasulaitoksiin (Kuva 7.12a). Höyryturbiini on myös maailman yleisin hukkalämmön hyödyntäjä kombivoimaloissa. Koska se vaatii hukkalämmön korkeassa lämpötilassa, sitä käytetään vain kaasuturbiinin kanssa. Kiertoainetta vaihtamalla turbiini saadaan toimimaan alemmilla hukkalämmön lämpötiloilla. Yleisimmin näissä turbiineissa on orgaaninen kiertoaine, jolloin ne ovat ORC-turbiineita (Organic Rankine Cycle, Kuva 7.12b).



Kuva 7.12 Biokaasulaitosten ECT-koneita: a) 75 kW, höyryturbiini Leipzigissa. b) 1,3 MWe ORC-turbiini kombikäytössä Espoossa. Kuvat: Ari Lampinen



Kuva 7.13 Biokaasulaitosten IC-koneita: a) Sisun kotimainen 30 kW otto-moottori Kalmarin maatalokohteisella biokaasulaitoksella Laukaassa. b) 75 kW diesel-moottori reaktorilaitoksella Leipzigissa. c) Kaksi 60 kWe mikro turbiinia kaatopaikalla Vaasassa. Kuvat: Ari Lampinen

## 7.6.2 ICE- ja ICT-lämpövoimakoneet

Lämpövoimakoneet, joissa polttoaine palaa koneen sisällä (Kuva 7.13), ovat joko mäntämoottoreita (ICE, internal combustion engine, esimerkiksi ottomoottori) tai turbiineita (ICT, internal combustion turbine, esimerkiksi kaasuturbiini). Sisäisen polton vuoksi polttoaineen laatuvaatimukset ovat tarkemmat kuin ECE- ja ECT-koneilla. Niitä valmistetaan myös huonolaatuisille kaasuille, joissa metaanipitoisuus on alhainen ja epäpuhtauspitoisuudet ovat korkeat. Epäpuhtauksien sietokykyä parannetaan materiaali- ja voiteluainevalinnoilla. Se on kuitenkin turbiineilla selvästi huonompi kuin mäntämoottoreilla (Taulukko 7.6).

Pienet otto-moottorit ovat alimman hyötysuhteen (15 %) koneita, joita biokaasusähkön tuotannossa käytetään, mutta korkeimmillaan otto-moottoreilla päästään 40 %:iin. Otto-moottoreiden tunnetusti alhainen hyötysuhde bensiinikäytössä johtuu bensiinin huonosta moottoriteknisestä laadusta (oktaaniluku alle 100). Biokaasulla on kaikista polttoaineista korkein oktaaniluku (yli 150), joten ottomoottorit voidaan toteuttaa yhtä korkealla hyötysuhteella kuin dieselmoottorit. Jalostus pudottaa biokaasun oktaaniluvun alle 140:n, mutta se on kuitenkin maakaasua korkeampi (Taulukko 7.3).

Otto-moottori on kaasujen käyttöä varten kehitetty moottori, kun taas diesel-moottori on kehitetty nestemäisten polttoaineiden käyttöön. Vaikka on olemassa kaasumaisia polttoaineita (erityisesti DME), joita dieselmoottorissa voidaan yksinkin käyttää, metaanipolttaineiden syttymisherkkyys ei siihen riitä eli niiden setaaniluku on liian alhainen. Siksi niitä käytetään dualfuel-tekniikalla eli sytyttämällä pienellä määrällä diesel-polttoainetta ja tuomalla biokaasu sylinteriin yhdessä polttoilman kanssa. Biokaasun energiaosuus vaihtelee välillä 70 – 99 %. Korkeimpiin osuuksiin päästään nykyään vain MWe-kokoluokan moottoreissa, mutta biokaasu-

laitoksille tyypillisessä 100 kW<sub>e</sub>:n kokoluokassa parhaimmilla moottoreilla saavutetaan 95 % osuus.

Kaasuturbiinien etuna on erittäin korkea teho/painosuhte, mutta niiden hyötysuhde on varsin alhainen. Koska ne tuottavat hukkalämpöä korkeassa lämpötilassa, niitä käytetään kombivoimalaitoksissa yhdessä höyryturbiinien kanssa. Pieniä kaasuturbiineita kutsutaan mikro-*turbiineiksi*.

### 7.6.3 Polttokennot

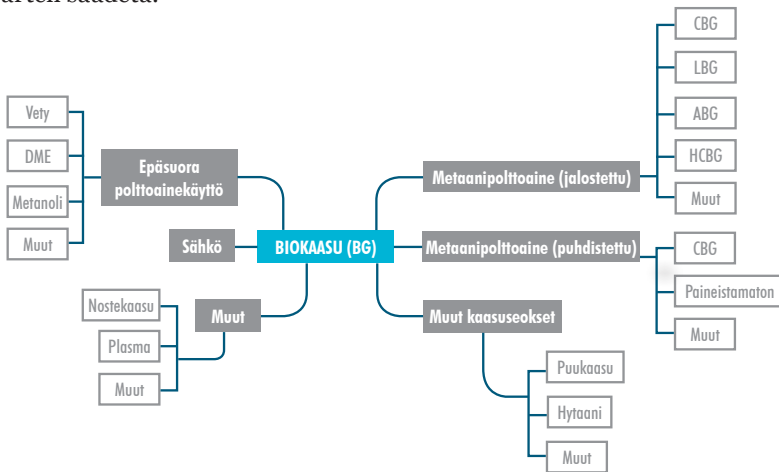
Polttokennoissa sähkö tuotetaan sähkökemiallisesti eli polttamista ei tapahdu. Kaikilla polttokennoteknologioilla biokaasua ei ole mahdollista hyödyntää, mutta muutamilla on (Kuva 7.14). Niistä kaksi on nykyään kaupallisessa käytössä: SOFC (solid oxide fuel cell) ja MCFC (molten carbonate fuel cell). Lämpövoimakoneiden tavoin biokaasun inertit komponentit (CO<sub>2</sub> ja N<sub>2</sub>) eivät haittaa niitä suurinakaan pitoisuuksina, joten jalostusta ei tarvita. Mutta kaikille polttokennoteknologioille on yhteistä, että epäpuhtauksien sietokyky on erittäin alhainen, joten puhdistusprosessilta vaaditaan enemmän kuin lämpövoimakoneita käytettäessä (Taulukko 7.6). Koska polttokennot eivät ole lämpövoimakoneita, ne eivät ole Carnot'n hyötysuhteen rajoittamia. Niillä voidaan saavuttaa selvästi korkeampi hyötysuhde kuin lämpövoimakoneilla, mutta kaupallisilla laitoksilla hyötysuhteet ovat selvästi demonstraatiolaitoksia alempia. Esimerkiksi Kuvan 7.14 mikro-CHP-laitteen hyötysuhde on 25 % eli sama kuin Kuvan 7.11 stirling-järjestelmällä. Näille kahdelle teknologialle on yhteistä sopivuus pieneen kokoon ja alhainen melutaso, joten ne soveltuvat asutusalueillekin.



Kuva 7.14 SOFC-polttokennoja: a) Wärtsilän 20 kW<sub>e</sub>:n polttokennojärjestelmä kaatopaikkakaasukäytössä Vaasassa. b) 1 kW<sub>e</sub>:n polttokenno  $\mu$ CHP-järjestelmiä varten esittelyssä Berliinissä. Kuvat. Ari Lampinen

## 7.7 Biokaasun käyttö liikennepolttoaineena

Biokaasua voidaan käyttää liikenne- ja työkonepolttoaineena monella eri tavalla (Kuvio 7.9). Sitä voidaan hyödyntää puhdistettuna, siis ilman jalostusta, mikäli ajoneuvot muunnetaan tarkoitusta varten. Ajoneuvoissa hyödynnetään samanlaisia moottoreita kuin sähköntuotannossa, jossa jalostettua biokaasua ei yleensä käytetä (Luku 7.6). Teknisiä esteitä puhdistetun biokaasun liikennekäyttöön ei siis ole. Se on kuitenkin harvinaista johtuen alhaisemmasta energiatiheydestä eli suuremmasta ajoneuvojen polttoainetankin tarpeesta jalostettuun biokaasuun verrattuna. Kaikki tehdasvalmisteiset metaaniajoneuvot on suunniteltu jalostettua biokaasua ja jalostettua maakaasua varten. Puhdistettua biokaasua tai puhdistettua maakaasua ei niissä voi käyttää, ellei niitä erikseen tarkoitusta varten säädetä.



Kuvio 7.9 Biokaasun tekniset käyttömahdollisuudet liikennepolttoaineena.



Kuva 7.15

Esimerkkejä erilaisista metaanikäyttöisistä ajoneuvoista maantie-, raide-, vesi-, ilma- ja avaruusliikenteessä. Ne edustavat seuraavia moottorityyppisiä: otto-, 2-tahti-, diesel-, siuhku- ja raketimoottori, höyry- ja kaasuturbiini sekä polttockenno. (Lampinen 2012)

Metaani on ainoa polttoaine, joka sopii kaikkiin liikenteessä käytettäviin moottorityyppeihin (Taulukko 7.4) ja kaikkiin liikennemuotoihin (Kuva 7.15). Selvästi yleisin liikenteen moottorityyppi on otto-moottori. Biokaasun oktaaniluku on yli 130 (Taulukko 7.3), joten se on moottoriteknisesti paras otto-moottoripolttoaine.

Taulukko 7.12 Metaaniajoneuvotyypit.

MGV-tyyppi	Kuvaus	Eräitä voimanlähdevaihtoehtoja	Muita energianlähteitä
Monofuel	vain metaanipolttoaine: lämpövoimakone	otto, 2-tahti, wankel, stirling, kaasuturbiini, suihkumoottori, rakettimeoottori	hytaani
FCEV	vain metaanipolttoaine: polttokenno	polttokenno + sähkömoottori	ei
Hybridi	vain metaanipolttoaine: lämpövoimakone + muu voimanlähde	HEV: otto/kaasuturbiini + sähkömoottori; CAV: otto + paineilmamoottori	hytaani
Bifuel	valinnaisesti 2 polttoainetta, 2 polttoainejärjestelmää	otto, höyryturbiini	bensiini, polttoöljy
Dualfuel	2 polttoainetta yhtä aikaan, 2 polttoainejärjestelmää	diesel	dieselpolttoaineet
FFV	vähintään 2 polttoainetta ja niiden sekoitukset, 1 polttoainejärjestelmä	otto	vety, propaani, puukaasu
Trifuel	3 polttoainetta	otto	etanoli, metanoli
Multifuel	vähintään 4 polttoainetta	otto, höyryturbiini	kaikki polttoaineet
Ladattava hybridi	metaanipolttoaine ja muu energianlähde	PHEV: otto + sähkömoottori; CAV: otto + paineilmamoottori	sähkö, paineilma
Kombi	moottorin hukkalämmöstä lisätehoa toisella lämpövoimakoneella	kaasuturbiini + höyryturbiini, otto + ORC-turbiini	

Metaaniajoneuvot eli MGV:t (methane gas vehicle) jaetaan Taulukon 7.12 mukaisiin tyyppeihin niiden polttoainekäyttömahdollisuuksien mukaan. Ajoneuvo voi kuulua useampaan kuin yhteen tyyppiin. Kaikki hybridit ovat lisäksi mono-, bifuel-, multifuel- tai dualfuel-ajoneuvoja. Dualfuel-ajoneuvo voi olla myös multifuel-ajoneuvo. Tehdasvalmisteisia metaaniajoneuvomalleja löytyy lähes 2000, suurin osa ottomoottorilla varustettuja, mutta edustaen myös lukuisia muita moottorityyppejä. Jälkimuunnoksella mikä tahansa ajoneuvo saadaan kulkemaan metaanilla, yleensä alkuperäisen polttoaineen lisäksi. Metaani on kolmanneksi eniten käytetty liikennepolttoaine globaalisti bensiinin ja dieselöljyn jälkeen eli se on eniten käytetty vaihtoehtoinen polttoaine.

Yleisimmin biokaasu varastoidaan ajoneuvoissa paineistettuna (CBG = Compressed BioGas). Varastointipaineet 200 baria ja 250 baria on standardoitu maantieajoneuvoille siten, että 250 baria on tarkoitettu vain raskaille autoille. Muissa metaaniajoneuvoissa voidaan käyttää korkeampia paineita, esimerkiksi 700 baria, joka on standardoitu vetyautoille. Nesteytettyä biokaasua (LBG = Liquefied BioGas) käytetään yleensä vain raskaissa ajoneuvoissa. Adsorboitua tai absorboitua biokaasua (ABG = Adsorbed/Absorbed BioGas) käytetään nykyään demonstraatioina. Tämä tulososa oleva teknologiaa mahdollistaa kiinteän varastoinnin.

CBG-tankkausasemat ovat joko nopea- tai hidastankkausasemia. Kaikki julkiset ja osa yksityisistä asemista on nopeatankkausasemia, joissa tahtuman kesto on minuutteja (Kuva 7.16). Nopeus johtuu siitä, että kaasu tulee suoraan korkeapaineisesta varastosta. Joissakin niistä päävarasto on LBG:nä, josta sitä höyrytetään CBG-välivarastoon. Näitä kutsutaan LCBG-asemiksi. LBG-asetat ovat aina nopeatankkausasemia. Osa niistä sisältää myös CBG-tankkausmahdollisuuden (LBG+LCBG-asema).



Kuva 7.16 Nopeatankkausasemia: a) CBG-asema Joutsassa. b) LBG+LCBG-asema Göteborgissa (CBG vasemmalla, LBG keskellä). Kuvat: Ari Lampinen

Hidastankkausasemissa tankkaus kestää tunteja ja suoritetaan tyypillisesti yön yli (Kuva 7.17). Niissä ei ole korkeapaineista välivarastoa, vaan paineistus tehdään tankkauksen yhteydessä. Ne voivat olla erittäin suuria, kuten bussivarikoiden asemat Ruotsissa, mutta pienimmät ovat omakotitaloihin tarkoitettuja kotitankkausasemia.





Kuva 7.17 Hidastankkausasemia: a) Suuri bussivarikon asema Linköpingissä. b) Kotitankkausase-  
ma Laukaassa. Kuvat: Ari Lampinen

Suomessa oli vuoden 2014 lopussa 24 julkista biokaasun tankkausase-  
maa, jotka kaikki olivat CBG100-asemia eli myivät 100 % biokaasua  
(Lampinen 2014). Niiden lisäksi Suomessa oli kaksi suurta yksityistä ase-  
maa sekä kotitankkausasemia ja mobiiliasemia, joten yhteensä biokaa-  
sua voitiin tankata yli 50 asemalta. Kaikki liikennebiokaasu oli jalostet-  
tua ja peräisin yhdeksästä jalostamosta (Taulukko 7.9).

## 7.8 Biokaasun muu energiakäyttö

Biokaasun energiakäytön mahdollisuudet eivät rajoitu edellisissä alalu-  
vuissa esiteltyihin lämmitykseen, sähkön tuotantoon ja ajoneuvomoot-  
torikäyttöön. Muut tavat ovat nykyään harvinaisia, mutta osalla niistä  
on ollut suuri historiallinen rooli ja osa niistä voi tulevaisuudessa nous-  
ta merkittävään asemaan. Esimerkkejä ovat:

- ✓ valaistus
- ✓ jäähdytys
- ✓ mekaaninen energia
- ✓ kaasuseoskäyttö
- ✓ epäsuora energiakäyttö

Kaasulamppu on kaasumaisten polttoaineiden ensimmäinen laajamit-  
tainen moderni käyttösovellus. Sillä on erittäin suuri historiallinen mer-  
kitys, koska se johti kaasun tuotannon (kaasulaitokset) ja siirron (kaa-  
suverkot) teollisen infrastruktuurin luomiseen. Ne luotiin alun perin  
1800-luvun alusta alkaen kaupunkikaasua (josta osa on metaania) var-  
ten, mutta ne loivat pohjan myös metaanipolttoaineiden laajamittaiselle  
hyödyntämiselle 1880-luvulta alkaen. Valaistus oli ensimmäinen biokaa-  
sua hyödyntämistapa Suomessa (Luku 10). Helsingin jätevedenpuhdistus-  
laitoksen yhteydessä olevan biokaasulaitoksen kaasua ryhdyttiin 1930-luvulla

siirtämään Helsingin kaupunkikaasuverkossa erilaisiin käyttötarkoituksiin, joista kadunvarsien ja sisätilojen valaistus oli tärkein (Kuva 7.18). Nykyään pienet kaasulamput yhdistettynä suoraan kehitysmaiden kotitalouskokoaluokan tai kyläkokoaluokan biokaasureaktoreihin ovat tärkein biokaasun valaistussovellus.



Kuva 7.18 Helsingin katuväläistus oli biokaasun ensimmäinen hyötykäyttömuoto Suomessa 1930-luvulla. Tässä sovelluksessa biokaasua käytettiin sekoitettuna kaupunkikaasun kanssa. Kuva: Ari Lampinen

Absorptiolämpöpumpputeknologialla jäähdytyksen energia saadaan lämmöstä. Biokaasulla voidaan tuottaa jäähdytysenergiaa joko suoraan absorptiolämpöpumppujärjestelmässä polttamalla (Kuva 7.19a) tai tuomalla sinne lämpöä esimerkiksi biokaasusähköön tuotannon hukkalämmöllä (Kuva 7.19b). Sähköntuotannon hukkalämmön viilennyskäytöllä on merkittävät tulevaisuuden mahdollisuudet, sillä absorptiolämpöpumput toimivat myös alhaisilla lämpötiloilla. Tämä teknologia soveltuu paitsi rakennuskohtaisesti myös taajamien kaukokylmäjärjestelmiin, jolloin ne tarjoavat CHP-laitoksille ympärivuotisen kuorman.



Kuva 7.19 Biokaasukäyttöisiä absorptiokylmäkoneita: a) Biokaasua polttavia jääkaappeja Haminaassa. b) Biokaasusähköön tuotannon hukkalämpöä tilojen viilennykseen hyödyntävä absorptiolämpöpumppu Kouvolan seudun ammattiopiston Biosampo-koulutuskeskuksessa Anjalassa. Kuvat: Ari Lampinen

Biokaasua käytetään mekaanisen energian tuotantoon paitsi ajoneuvoissa myös esimerkiksi pumppuihin ja puhaltimiin suoraan kytkettyjen moottoreiden kautta. Se on nykyään harvinaista sähkömoottoreiden vallitsevan aseman takia. Suoran mekaanisen käytön etuna on riippumattomuus sähköstä eli se vähentää järjestelmän haavoittuvuutta ja soveltuu alueille ja tilanteisiin, joissa sähköä ei ole saatavilla. Toinen etu on sähkön tuotannon ja siirron häviöiden välttäminen. Biokaasun paineistettu varastointi luo epäsuoran mekaanisen energian käyttösovelluksen biokaasun siirrossa. Sekin vähentää riippuvuutta sähköjärjestelmistä ja niihin aina sisältyvää haavoittuvuutta.

Biokaasua voidaan sekoittaa muiden energiakaasujen kanssa monista syistä (Kuvio 7.9). Hytaani eli metaanin ja vedyn seos antaa mahdollisuuden vedyn hyödyntämiseen olemassa metaaniajoneuvoissa (Kuva 7.20). Biokaasua sekoitetaan maakaasun kanssa, kun sitä kuljetetaan metaaniverkoissa. Puukaasu ja propaani ovat muita esimerkkejä biokaasun kanssa sekoitettavista kaasuista.



Kuva 7.20 Kaksi erilaista biokaasun ja vedyn yhdistämistapaa: a) Hytaanin tankkauspaikka Ruotsissa. b) Kaatopaikkakaasusta höyryreformoinnilla valmistetun vedyn tankkausasema Norjassa. Kuvat: Ari Lampinen

Biokaasun epäsuoriin energiakäyttötapoihin sisältyy sähkön lisäksi siitä valmistetut polttoaineet (Kuvio 7.9). Näitä ovat esimerkiksi vety (Kuva 7.20b), DME ja metanoli. Niiden valmistus ei edellytä jalostusta.

## 7.9 Sivutuotteet ja muut käyttösovellukset

Energiakäytön lisäksi biokaasua voidaan hyödyntää materiaalina, kemianteollisuuden raaka-aineena monenlaisten tuotteiden valmistuksessa. Biokaasua voidaan hyödyntää myös muiden kuin energiaominaisuuksiensa, kuten keveys ja kylmäkestävyys, pohjalta.

Biokaasun tuotannon ja käsittelyn yhteydessä on erotettavissa sivutuotteita. Näistä mädätysjäännös on olennaisen tärkeä osa biokaasuteknologian tarjoamaa resurssien kierrätystä (Kuvio 7.2). Sen lisäksi on

erotettavissa muitakin sivutuotteita, kuten hiilidioksidia ( $\text{CO}_2$ ), vetyä ( $\text{H}_2$ ), rikkiä (S) ja typpeä ( $\text{N}_2$ ). Kaatopaikkakaasu poikkeaa reaktorikaasusta sikäli, että se saattaa sisältää runsaasti erilaisia hyödynnettävissä olevia komponentteja. Hiilidioksidilla on erityisen paljon potentiaalisia sovelluksia, joista kasvihuonelanointu on yksinkertaisin. Kryojalostamoista ja LBG-tuotantolaitoksista saatavalle nesteytetylle hiilidioksidille ( $\text{LCO}_2$ ) on paljon potentiaalisia markkinoita: eräs Ruotsissa sovellettu esimerkki on  $\text{LCO}_2$ :n kylmäainekäyttö kylmäkuljetusautoissa (Kuva 7.21a). Korkeateknisin esimerkki on puhdistetun biokaasun hiilidioksidin hyödyntäminen Sabatier-reaktorissa tuulimetaanin tuotantoon Saksassa (Luku 10). Siinä sovelluksessa jalostusta ei tarvita (Kuva 7.21b).



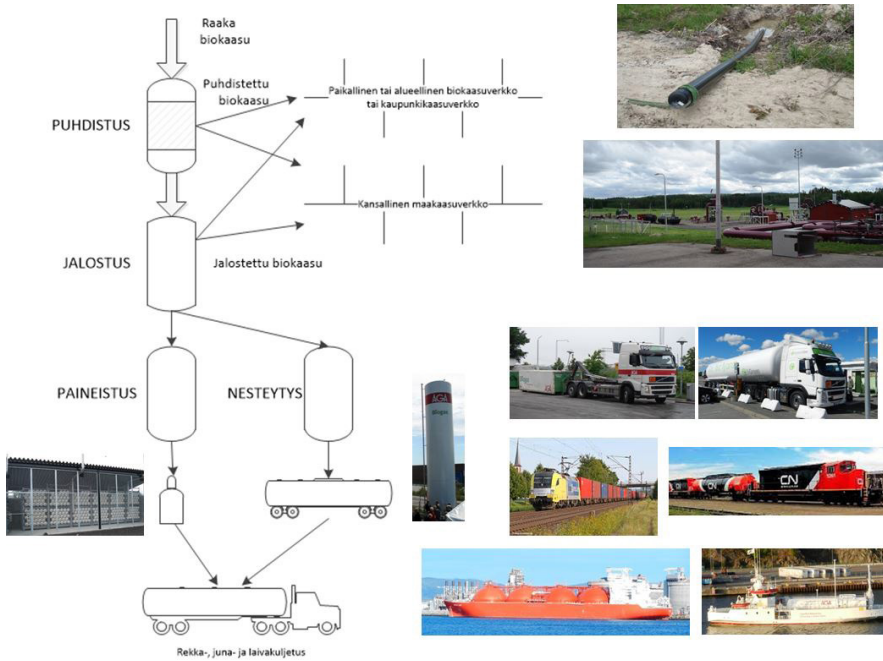
Kuva 7.21 Biokaasun sisältämän hiilidioksidin kehittyneitä hyödyntämistapoja: a) Kylmäkuljetusautojen  $\text{LCO}_2$ -tankkauspaikka Lidköpingissä Ruotsissa. Biokaasulaitos, joka tuottaa LBG:tä ja  $\text{LCO}_2$ :tä, sijaitsee puolen kilometrin päässä. b) Biokaasulaitoksen hiilidioksidia tuulimetaanin valmistuksessa hyödyntävä Sabatier-reaktori Fraunhofer-instituutissa Bad Hersfeldissa. Kuvat Ari Lampinen

## 7.10 Biokaasun kuljetus

Biokaasua kuljetetaan putkisiirtona, maanteitse, rautateitse ja vesiteitse (Kuvio 7.10). Vuonna 2014 Suomen biokaasusta noin 95 % kuljetettiin biokaasuputkilla ja loput maanteitse ja metaaniverkossa. Kaikki puhdistettu kaasu siirrettiin biokaasuputkilla. Jalostettua kaasua siirrettiin biokaasuputkilla 6 jalostamosta, metaaniverkossa 3 jalostamosta ja maanteitse CBG-konteissa 1 jalostamosta (Taulukko 7.9).

Taulukossa 7.13 esitetään biokaasun kuljetustavat. Putkisiirto on käytävissä sekä raa'alle, puhdistetulle että jalostetulle kaasulle. Kuljetusvaihtoehtot vaihtelevat muutamasta metrillä tuhansiin kilometreihin. CBG:nä kuljetetaan yleensä jalostettua, mutta voidaan kuljettaa myös puhdistettua kaasua. CBG:n tuotantopaikat ovat yleensä pieniä, joten se sopii

hajautettuun jakeluun. Se tehdään lähes aina maanteitse alle 500 km etäisyyksille. Koska CBG-kuljetuksissa sovelletaan standardikontteja, ne sopivat myös rautatie- ja vesikuljetuksiin huomattavasti pidemmillekin matkoille. LBG:nä kuljetetaan vain jalostettua kaasua. LBG:n tuotantopaikat ovat yleensä suuria ja niistä kaasua kuljetetaan pitkien matkojen päähän, jopa valtameren yli.



Kuvio 7.10 Biokaasun kuljetusvaihtoehdot.

### 7.10.1 Putkikuljetus

Puhdistettua biokaasua siirretään paikallisilla biokaasuputkilla sekä tuottajien omiin kohteisiin että suurille kuluttajille (Kuva 7.22). Se on nykyään dominoiva biokaasun kuljetusmuoto Suomessa. Voidaan myös toteuttaa paikallinen biokaasuverkko puhdistetulle tai jalostetulle kaasulle. Näissä verkoissa on useita tuottajia ja kuluttajia ja se voi ulottua aina omakotitaloihin asti, jolloin niihin voidaan asentaa mikro-CHP-laitteita (Kuvat 7.11 ja 7.14), kotitankkausasemia (Kuva 7.17) ja muita biokaasua suoraan käyttäviä laitteita (Kuvat 7.9 ja 7.19). Paikallisten biokaasuverkkojen kautta syötettävän kaasun laatuvaatimukset määräytyvät niihin kytkettyjen laitteiden mukaisesti.

Taulukko 7.13 Kuljetustavat raaka-alle, puhdistetulle ja jalostetulle biokaasulle.

	Putki	Maantie	Rautatie	Vesitie
Laitosalueella (100 m)	- Raaka ja puhdistettu - Matalapaineinen - Biokaasuputki			
Paikallisesti (10 km)	- Puhdistettu ja jalostettu - Keskipaineinen - Biokaasuputki, biokaasuverkko, kaupunkikaasuverkko, metaanijakeluverkko	- Jalostettu ja puhdistettu - CBG - LBG		
Alueellisesti (100 km)	- Puhdistettu ja jalostettu - Keskipaineinen - Biokaasuverkko, metaanijakeluverkko	- Jalostettu - CBG - LBG		- Jalostettu - LBG - CBG
Kansallisesti (1000 km)	- Jalostettu ja puhdistettu - Korkeapaineinen - Metaanisiirtoverkko	- Jalostettu - CBG - LBG	- Jalostettu - LBG - CBG	- Jalostettu - LBG - CBG
Kansainvälisesti (10 000 km)	- Jalostettu - Korkeapaineinen - Metaanisiirtoverkko	- Jalostettu - LBG - CBG	- Jalostettu - LBG	- Jalostettu - LBG



Kuva 7.22 Biokaasuputkia: a) Paikallisia biokaasuputkia Suomessa. b) Biokaasuverkon putki Ruotsissa. Kuvat: Ari Lampinen

Puhdistettua biokaasua voidaan kuljettaa myös kaupunkikaasuverkkojen kautta, jolloin se sekoitetaan puusta tai muista (yleensä kiinteistä) polttoaineista valmistetun kaupunkikaasun kanssa. Se oli ensimmäinen biokaasun kuljetusmuoto Suomessa 1930-luvulla (Kuva 7.18), ja eräissä maissa sitä käytetään edelleen. Jalostusta ei tätä varten tarvita, koska puhdistetun biokaasun tekninen laatu on kaupunkikaasua parempi ja siten riittää kaupunkikaasuverkkoon liitetyille laitteille.

Pitkillä matkoilla jalostettua tai puhdistettua biokaasua voidaan kuljettaa alun perin jalostettua maakaasua varten rakennetun kansallisen metaanin siirtoverkon kautta ja paikallisesti metaanin jakeluverkon kautta. Näissä tapauksissa biokaasu sekoitetaan maakaasun tai muun fossiilisen metaanin kanssa. Puhdistettua biokaasua voidaan siirtää, mikäli se ei pudota sekoitetun kaasun teknisiä ominaisuuksia alle verkoston minimivaatimusten eli verkon kaasuseoksen ominaisuudet riittävät verkkoon liitetyille laitteille. Teknisesti se ei edellytä, että verkkoon syötetty puhdistettu biokaasu täyttää laitteiden laatuvaatimukset johtuen sekoittumisesta jalostetun kaasun, useimmiten pääasiassa jalostetun maakaasun, kanssa. Yleensä kuitenkin biokaasu syötetään metaaniverkkoihin jalostettuna. Kansalliset energiamarkkinaviranomaiset ovat joissakin maissa määritelleet laatuvaatimuksia, jotka metaaniverkkoihin syötettävän kaasun on täytettävä (Taulukko 7.3). Ne vaihtelevat huomattavasti toisistaan eri maissa ja alueilla, ja joissakin maissa on useita laatutasoja mutta useimmiten (ei kuitenkaan aina) jalostusta edellytetään. Kun niitä ei kansallisesti ole määritelty (kuten Suomessa), ne määritellään kaasuverkon operaattorin ja kaasun syöttäjän välisellä sopimuksella, jonka oikeudenmukaisuutta kansalliset energiamarkkinaviranomaiset valvovat EU:n kaasumarkkinalainsäädännön ohjaamana.

### 7.10.2 Kuljetus paineistettuna (CBG) ja nesteytettynä (LBG)

Paineistettuna (CBG) kuljetetaan yleensä jalostettua biokaasua, mutta se on mahdollista puhdistetullekin biokaasulle. Kaupallisia CBG-kuljetuksia varten on saatavilla runsaasti standardimerikontteihin sijoitettuja ratkaisuja (Kuva 7.23). Nämä 6 tai 12 metrin pituiset kontit soveltuvat sekä maantie-, rautatie- että vesikuljetuksiin. Niiden kuljetuskapasiteetit vaihtelevat paljon ja ovat suurimmillaan noin 120 MWh. Esimerkiksi kuorma-autoihin voidaan sijoittaa suurempikin kapasiteetti, mikäli standardikontteja ei käytetä tai varastointipainetta nostetaan. Toisaalta CBG-kuljetuksia tehdään myös pienemmässä mittakaavassa, johon kevyet pakettiautot soveltuvat (Kuva 7.23).



Kuva 7.23 CBG-maantiekuljetus: a) Jepuan Biokaasun 6 metrin standardikontti Uudessakaarlepysssä. b) Tankkaus Joensuussa pakettiautoon sijoitetusta mobiiliasemasta. Kuvat: Ari Lampinen

Nesteytettynä (LBG) kuljetetaan vain jalostettua biokaasua. LBG vastaa energiasisällöltään 600 barin paineistettua biokaasua. Sitä kuljetetaan vesiteitse, rautateitse ja maanteitse. Maantiekuljetuksissa käytetään sekä puoliperävaunurekkoja (Kuva 7.24) että täysperävaunurekkoja. LBG-täysperävaunurekkoihin mahtuu enimmillään 80 m<sup>3</sup> eli 28 tonnia LBG:tä (530 MWh).

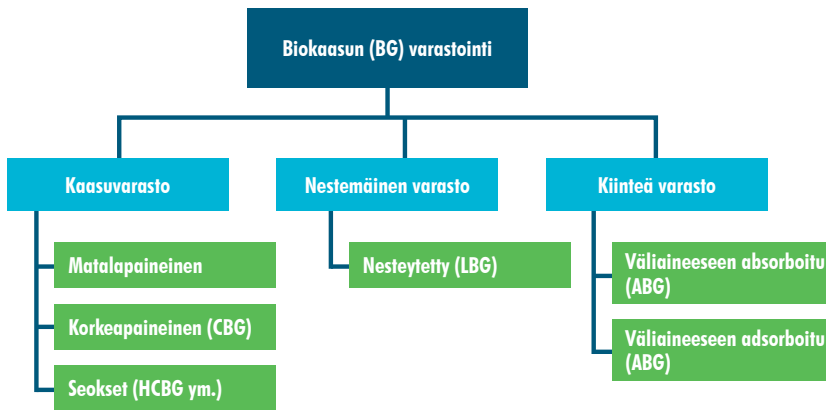


Kuva 7.24 Lidköpingissä valmistettua LBG:tä sisältävä puoliperävaunurekka tulossa täyttämään LBG-tankkausaseman säiliötä Göteborgissa. Rekka on LBG-käyttöinen Volvo FM Met-haneDiesel. Kuva: Ari Lampinen

## 7.11 Biokaasun varastointi

Biokaasua varastoidaan kaasumaisessa ja nestemäisessä olomuodossa. Biokaasua voitaisiin kuitenkin varastoida adsorboituna tai absorboituna myös kiinteisiin aineisiin (Kuvio 7.11).





Kuvio 7.11 Biokaasun varastointivaihtoehdot. CBG = Compressed BioGas, LBG = Liquefied BioGas, ABG = Absorbed/Adsorbed BioGas, HCBG = paineistettu biokaasun ja vedyn seos (hytaani).

### 7.11.1 Varastointi kaasumaisessa olomuodossa

Matalapaineinen (alle 10 bar) varastointi on aina osa biokaasun tuotantoprosessia. Biokaasua varastoidaan biokaasulaitoksilla matalapaineisena biokaasureaktoreissa ja jälkikaasuuntumisaltaissa (Luku 6). Se on välttämätöntä, koska biokaasua syntyy jatkuvasti ja riippumatta sen kulutuksesta. Koska kulutus ei ole jatkuvaa, biokaasun varastointikapasiteetti on tarpeen mitoittaa riittäväksi normaalitoimintaa varten. Huollon ja muiden poikkeustilanteiden takia soihtu (Kuva 7.2) on biokaasulaitoksilla pakollinen, jotta metaanivuodoilta vältytään.

Energian varastoinnissa käytettävissä olevista teknologioista (Taulukko 7.14) metaani tarjoaa selvästi suurimman kapasiteetin. Suurimmat nykyiset metaanivarastot on rakennettu maakaasua varten ja pystyvät varastoimaan yli 100 TWh energiaa. Ne ovat käytettävissä myös biokaasulle. Suurin potentiaalinen tulevaisuuden merkitys on aurinko- ja tuulivoiman varastoinnissa, sillä metaanin avulla niiden keskeytyvästä tuotannosta aiheutuva ongelma voidaan ratkaista koko maan mittakaavassa. Näin näille uusiutuville energiamuodoille voitaisiin saavuttaa merkittävä osuus energian kokonaiskulutuksesta. Metaanin miljoonien vuosien varastointiaika tarjoaa ratkaisun myös energian huoltovarmuusongelmaan, sillä raakaöljytuotteet pilaantuvat jo vuoden varastoinnin jälkeen.

Taulukko 7.14 Energian varastointitekniikat.

Teknologia	Varastointikapasiteetti	Varastointiaika
Metaani (matalapaineinen)	1 MWh – 500 TWh	1 h – 10 000 000 v
Vety (matalapaineinen)	1 MWh – 10 TWh	1 h – 1 v
Dieselöljy	100 kWh – 1 TWh	1 h – 1 v
Pumppuvoimala	1 GWh – 100 GWh	10 h – 1 kk
Paineilma	10 MWh – 10 GWh	1 h – 100 h
Lämpöakku	100 kWh – 5 GWh	10 h – 1 kk
Akku	1 kWh – 10 MWh	100 s – 1 kk
Vauhtipyörä	1 kWh – 100 kWh	10 s – 1 h
Kondensaattori	1 kWh – 10 kWh	1 s – 50 s

Matalapaineista biokaasun varastointia sovellettiin kaasupussien avulla myös liikennevälineissä ja pienissä työkoneissa ensimmäisen kerran Saksassa 1940-luvulla. Sen jälkeen kyseistä teknologiaa on käytetty eniten maakaasun varastoinnissa kiinalaisissa linja-autoissa.

Biokaasun varastointi paineistettuna (CBG) oli ensimmäinen ja edelleen ylivoimaisesti tärkein biokaasun varastointitapa ajoneuvoissa (Kuva 7.23). Maailman ensimmäisissä metaaniajoneuvoissa Saksassa 1920-luvulla käytettiin kompressoitua synteettistä maakaasua ja maailman ensimmäiset biokaasuajoneuvot 1930-luvulla Saksassa hyödynsivät samaa teknologiaa (Lampinen 2013). Myöhemmin 1930-luvulla se levisi maailman ensimmäisiin maakaasuajoneuvoihin Italiassa. Aluksi paine ajoneuvojen tankeissa oli 150 bar ja tankkausasemilla 200 bar. Paineet nousivat 1940-luvulla 200 bar:iin ja 350 bar:iin. Nykyään 200 bar:a on selvästi yleisin ajoneuvojen varastointipaine ja kevyissä autoissa standardoinnin takia käytännössä pakollinen. Raskaissa autoissa on standardi myös 250 bar:n varastoinnille. Raide-, vesi- ja ilmaliikenteessä ei varastointipaineelle ole standardia, joten niissä voidaan käyttää korkeitakin paineita, kuten 700 bar:a, joka on standardoitu vedylle autokäytössä.

Biokaasu voidaan varastoida myös seoksina muiden kaasujen kanssa. Biokaasun ja vedyn seosta eli hytaania käytetään ajoneuvoissa paineistettuna (HCBG).

### 7.11.2 Varastointi nestemäisessä olomuodossa

Nesteytettyä biokaasua (LBG) voidaan hyödyntää ajoneuvoissa tai biokaasun kuljetuksessa (Kuva 7.24). Sen energiatiheys vastaa 600 bar:n paineistettua biokaasua. Johtuen metaanin alhaisesta kiehumispisteestä (-161,6 °C) LBG ei sovellu pitkäaikaiseen varastointiin. Höyrystymisen takia se käytetään muutaman päivän sisällä nesteytyksestä.

### 7.11.3 Varastointi kiinteään väliaineeseen

Fossiilinen metaani esiintyy luonnossa yleisimmin kiinteän aineen sisällä, kemiallisesti sidottuna metaaniklatraatteina tai vapaana huokosen kiven mikro-onkaloissa. Näiden resurssien hyödyntäminen on kuitenkin vaikeampaa kuin maakaasuresurssien, joissa fossiilinen metaani on matalapaineisena kaasuväliaineena.

Biokaasu voidaan varastoida adsorboituna kiinteän aineen pintaan tai absorboituna kiinteän aineen sisään (ABG). Tarkoitukseen soveltuvia väliaineita on paljon. Esimerkiksi aktiivihiiltä sovelletaan adsorptioväliaineena ja kehitteillä on suuremman energiatiheyden tarjoavia synteettisiä adsorptiomateriaaleja. Potentiaalisesti suurin energiatiheys olisi saavutettavissa absorptiolla nanoputkiin, mutta myös muita fysikaalisen absorption väliaineita on saatavissa. Metaaniklatraatit eli kiinteät metaanihydraatit ovat esimerkki kemiallisesta absorptiosta.

ABG-teknologioita ei vielä ole tarjolla tehdasvalmisteisissa ajoneuvoissa, mutta niitä on saatavissa jälkiasennussarjoina. Niiden energiatiheys vastaa tavallisen 200 bar:n CBG-tankin energiatiheyttä, mutta teoriassa paljon suurempi energiatiheys on mahdollinen. ABG-teknologia kuitenkin tarjoaa mahdollisuuden toteuttaa muista syistä tarvittavia kiinteitä rakenteita ABG-väliaineilla. Siitä syystä energian varastointiin ei välttämättä tarvita erillistä tilaa.

## LÄHTEET JA LISÄTIETOA

- Arnold, M. 2009. Reduction and monitoring of biogas trace compounds. VTT Research Notes 2496, 79 p. *Linkki e-julkaisuun.*
- Bauer, F., Hulteberg, C., Persson, T. ja Tamm, D. 2013. Biogas upgrading – Review of commercial technologies. SGC Rapport 2013:270, Svensk Gasteknisk Center, 82 p. *Linkki e-julkaisuun.*
- Deublein, D. ja Steinhauser, A. 2008. Biogas from Waste and Renewable Resources. Wiley-VCH Verlag GmbH. 443 p.
- Kohl, A. ja Nielsen, R. 1997. Gas Purification. Fifth Edition. Gulf Professional Publishing, 900 p.
- Kättström, H. 2009. Kryotekniikka avaa mahdollisuuden suurimittaiselle liikennebiokaasutuotannolle. Biokaasu 1(1)8-10. *Linkki e-julkaisuun.*
- Lampinen, A. 2002. Stirling-kone opetusvälineestä hyötykäyttöön. Arkhimedes 54(6)19-23.
- Lampinen, A. 2012. Tiekartta uusiutuvaan metaanitalouteen – Sektoriraportti liikenne- ja viestintäministeriön työryhmälle Tulevaisuuden käyttövoimat liikenteessä. Pohjois-Karjalan liikennebiokaasuverkoston kehityshanke ja Suomen Biokaasuyhdistys ry. Pohjois-Karjalan liikennebiokaasuverkoston kehityshankkeen julkaisuja 1/2012, 133 s. *Linkki e-julkaisuun.*
- Lampinen, A. 2013. Development of biogas technology systems for transport. Tekniikan Waiheita 31(3)5-37.
- Lampinen, A. 2014. Liikennebiokaasu Suomessa 1941-2014. Teoksessa: Huttunen MJ & Kuittinen V: Suomen biokaasulaitosrekisteri n:o 17 – Tiedot vuodelta 2013. Publications of the University of Eastern Finland, Reports and Studies in Forestry and Natural Sciences No 19, School of Forest Sciences, Faculty of Science and Forestry, University of Eastern Finland, 12-26. *Linkki e-julkaisuun.*
- Petersson, A. ja Wellinger, A. 2009. Biogas upgrading technologies – developments and innovations. IEA Bioenergy Task 37, 19 p. *Linkki e-julkaisuun.*
- Wellinger, A., Murphy, J. ja Baxter, D. (eds.) 2013. The biogas handbook. Science, production and applications. IEA Bioenergy. Woodhead Publishing Ltd. Philadelphia. USA. 508 p.

## 8. Biokaasulaitostointiaan liittyviä ympäristönäkökohtia

Teija Paavola

Biokaasulaitoksen toimintaan liittyy olennaisena osana ympäristöasioiden hallinta, seuranta ja raportointi. Merkittävimmät osa-alueet ovat yleensä hajujen hallinta ja hajukaasujen käsittely sekä hule- ja jätevesien hallinta ja käsittely. Biokaasulaitos ei myöskään saa aiheuttaa häiritsevää melua ja laitos on suunniteltava siten, että metaanipäästöt prosessoinnista estetään.

Laitoksen toimintaa ja sen aiheuttamia ympäristövaikutuksia seurataan pääsääntöisesti omavalvontana, mutta viranomaisvalvontaa tekevät laitoksen koosta riippuen joko paikallinen tai alueellinen ympäristöviranomaisen ja Elintarviketurvallisuusvirasto. Ympäristövaikutusten vähimmäistarkkailusta määrätään ympäristöluvassa ja lannoitevalmisteiden laadun varmistamisessa noudatetaan tätä tarkoitusta varten laadittua omavalvontasuunnitelmaa.

### 8.1 Hajujen hallinta ja hajukaasujen käsittely

Biokaasulaitoksella muodostuvat hajut ovat peräisin laitoksella käsiteltävistä raaka-aineista, prosessoinnin eri vaiheissa olevista massoista ja lopputuotteista. Hajuyhdisteitä on lukematon määrä, mutta häiritsevimpinä koetaan useimmiten erilaiset rikin yhdisteet (rikkivety  $H_2S$ , metyylimerkaptaanin  $MeSH$ , dimetyylisulfidi  $DMS$  ( $C_2H_6S$ ) ja dimetyylidisulfidi  $DMDS$  ( $C_2H_6S_2$ ) ja ammoniakki ( $NH_3$ ), joiden hajukynnys on hyvin alhainen. Rikkivedylle ominainen haju on mädäntynyt kananmuna ja metyylimerkaptaanille kaalilaatikkomainen haju.  $DMS$ :n haju muistuttaa mädäntyvien kasvien hajua ja  $DMDS$ :n haju taas mädäntyvää kalaa. Lisäksi erilaiset haihtuvat orgaaniset yhdisteet (volatile organic compounds, VOCs) sisältävät myös epämiellyttäviä haisevia yhdisteitä (kuten erilaisia karboksyylihappoja, estereitä, ketoneita jne.). Epämiellyttävyyden lisäksi haisevat yhdisteet, kuten rikin yhdisteet ja ammoniakki voivat aiheuttaa terveyshaittoja ja VOC-yhdisteet ympäristöongelmia, kuten alailmakehän otsonin muodostumista ja yläilmakehän otsonin hajoamista (Lehtinen, 2012).

Biokaasulaitos koostuu yleensä vähintään raaka-aineiden vastaanottojärjestelmistä/-tiloista, varastosäiliöistä ja reaktoreista (esi-, hygienisointi-, biokaasu- ja jälkikaasureaktorit) ja lopputuotteiden varastosäiliöistä ja/tai varastohallista. Laitos on suunniteltava siten, että eri vaiheissa muodostuvat hajukaasut voidaan tehokkaasti kerätä ja johtaa hallitusti käsittelyyn. Maatilamittakaavan biokaasulaitoksilta ei yleensä edellytetä erityistä hajukaasujen keräys- ja käsittelyjärjestelmää, mikäli laitoksella käsitellään lähinnä maatalouden omia raaka-aineita.

Hajukaasuja muodostuu erityisesti raaka-aineiden vastaanotossa. Raaka-aineiden vastaanottojärjestelmät sijoitetaan suljettaviin, alipaineistettuihin hallitiloihin, jolloin raaka-aineiden vastaanotosta aiheutuvien hajujen leviäminen ympäristöön voidaan estää. Hallitilan hajukaasut johdetaan hajukaasujen käsittelyyn. Käsittelyyn johdetaan myös mahdollisen erillisen, suljettavan vastaanottoaltaan hajukaasut. Vastaanottojärjestelmän hajukaasujen muodostumiseen, vapautuviin yhdisteisiin ja niiden väkevyyteen vaikuttavat raaka-ainetyypin lisäksi erityisesti viipymä vastaanottojärjestelmässä. Yleisesti ottaen, raaka-aineet on syytä pyrkiä siirtämään kaasutiiviisiin reaktorisäiliöihin mahdollisimman nopeasti. Erittäin nopeasti hajoavat rasvat ym. nestemäiset raaka-aineet olisi hyvä vastaanottaa suoraan kaasutiiviisiin reaktorisäiliöihin. Kasvibiomassa ei yleensä aiheuta merkittävää hajukuormaa ja sen vastaanottojärjestelmät voidaan sijoittaa ulos.

Kaasutiiviissä varastosäiliöissä/reaktoreissa muodostuvat kaasut ovat yleensä määrältään vähäisiä, mutta erittäin väkeviä. Nämä kaasut voidaan johtaa tapauksesta riippuen joko hajukaasujen käsittelyyn tai yhdessä biokaasun kanssa hyödynnettäväksi. Hygienisointiyksiköiden hajukaasut johdetaan yleensä biokaasureaktoriin tai johonkin muuhun kaasutiiviiseen esivarastosäiliöön nestepinnan alle, jolloin hajukaasussa olevat rasvahapot päätyvät biokaasun raaka-aineeksi. Hajukaasuja vapautuu myös mädätysjäätännöksen jatkokäsittelyssä esimerkiksi lingolla. Jatkokäsittelyjärjestelmät, joista pääsee vapautumaan hajukaasuja, on sijoitettava sisätiloihin. Tällöin hajukaasut on hallittavissa ja ohjattavissa hajukaasujen käsittelyjärjestelmään joko alipaineistuksen tai kohdepoistojen avulla.

Myös lannoitevalmisteiden varastosäiliöt katetaan hajujen leviämisen estämiseksi. Joissakin tapauksissa myös näiden säiliöiden kaasutilat voidaan yhdistää hajukaasujen käsittelyjärjestelmään. Usein myös mekaanisen erottelun lopputuotteena muodostuvalle kiintoaineelle edellytetään katettua varastohallia, jolloin estetään hajujen leviäminen ilmapirtauksien mukana.

Väkevien hajukaasujen käsittelyssä käytetään yleisesti erilaisia pesureita, jotka voivat olla biologisia ja/tai kemiallisia. Pesurit ovat usein täytekappaleita sisältäviä reaktoreita, joissa kiertää pesuliuos ja jonka läpi hajukaasut johdetaan. Pesukemikaalina voi olla yksinkertaisimmillaan vesi,

mutta usein käytetään myös happoja ja emäksiä riippuen käsiteltävän hajukaasun ominaisuuksista.

Pesurin jälkeen hajukaasut johdetaan usein vielä biologiseen käsittelyyn eli biosuodattimelle, joita voi olla useampia toimien joko sarjassa tai rinnan. Biosuodattimissa käytetään suodatinmateriaalina erilaisia puupe räisiä massoja, kuten haketta, turvetta tai inerttejä materiaaleja, kuten lekasoraa. Hajuyhdisteiden käsittely perustuu mikrobiologiseen hapettamiseen. Biosuodatinta on kasteltava säännöllisesti, että mikrobitoiminta pysyy aktiivisena. Laimeita hajukaasuja esim. hallitiloista voidaan johtaa biosuodattimille suoraan. Biosuodattimet soveltuvat erityisen hyvin kohteisiin, joissa käsiteltävä kaasumäärä on suuri, mutta pitoisuudet alhaisia. Biosuodattimet voivat olla suljettuja rakenteita (Kuva 8.2) tai avoimia (Kuva 8.1) riippuen mm. mahdollisesta jatkokäsittelyn tarpeesta.



Kuva 8.1 Avoim biosuodatin. Lakeuden Etappi Oy. Kuva: Teija Paavola



Kuva 8.2 Etualalla vasemmalla hajukaasupesuri, oikealla suljettu biosuodatin ja keskellä aktiivihiihisuodatin. Hajukaasunäytteenotto aktiivihiihisuodatuksen jälkeen käynnissä. Biovakka Suomi Oy, Vehmaan biokaasulaitos. Kuva: Teija Paavola

Mikäli biosuodattimilla ei saavuteta riittävän alhaista hajutasoa, voidaan hajukaasu johtaa edelleen aktiivihiilisuodattimeen (Kuva 8.2). Aktiivihiilisuodatin on yleensä sylinterinmuotoinen säiliö, jonka tilavuus riippuu käsiteltävän kaasun ominaisuuksista ja halutusta hiilen vaihtovälistä. Käsiteltävä kaasu puhalletaan aktiivihiilimassan läpi ja erilaiset hajua aiheuttavat epäorgaaniset ja orgaaniset yhdisteet adsorboituvat hiileen. Hiilen rakennetta, huokoskokoa ja ominaisuuksia voidaan muokata poistettavien yhdisteiden perusteella.

Hajukaasujen käsittelyssä voidaan käyttää myös otsonointia. Otsoni on erittäin voimakas hapetin, joka pystyy reagoimaan lähes kaikkien aineiden kanssa. Otsonoinnin kontaktiaika ja otsonin oikea annostelu ovat tärkeimmät suunnittelussa huomioitavat asiat. Otsoni reagoi myös muiden kuin hajuyhdisteiden kanssa, joten sen annostuksen on oltava riittävä halutun tuloksen saavuttamiseksi.

Kokonaishajukuormaa ja hajunkäsittelyn tehokkuutta arvioidaan ja analysoidaan yleensä hajuyksikkömäärityksin. Olfaktometrisessä analyysissä mitataan kaasumaiselle näytteelle hajupitoisuus eli mittauspisteessä olevan hajun voimakkuus. Hajuyksikkö (HY m<sup>-3</sup>) tarkoittaa sitä laimennuskerrointa, jolla näytekäasu on laimennettava, jotta puolet hajupaneelin jäsenistä (4 testattua jäsentä) ei enää havaitse hajua. Useimmilla maatilakokoluokkaa suuremmilla biokaasulaitoksilla on ympäristöluvassa asetetut raja-arvot ja/tai hajunkäsittelyn tehokkuusvaatimus hajuyksikköpäästöille. Lisäksi raja-arvoja ja poistotehokkuusvaatimuksia voi olla asetettu riikin yhdisteille ja ammoniakille erikseen. Hajukaasuanalyyysien lisäksi toiminnanharjoittajalta voidaan edellyttää ympäristöhajutarkkailua, hajupaneeleita ja hajumallinnuksia. Ympäristöhajutarkkailun suorittaa yleensä jokin ulkopuolinen taho, joka kiertää säännöllisesti, esim. kerran kuukaudessa tai kerran viikossa, laitoksen ympäristössä muutaman kilometrin säteellä ja havainnoi mahdollisia hajuja. Hajupaneeli koostuu taas useammista henkilöistä. Hajupaneelin voi suorittaa jokin ulkopuolinen taho tai siihen voidaan pyrkiä saamaan mukaan paikallisia asukkaita, jotka pitävät päiväkirjaa hajuhavainnoista jonkin tietyn ajan, esim. vähintään kuukauden ajan. Hajumallinnus taas on matemaattinen laskelma hajupäästöjen leviämisestä ympäristöön normaali- ja poikkeustilanteissa. Mallinnuksessa huomioidaan vuoden aikojen vaikutus, tuulen suunnat, alueen maaston muodot ja alueen muut mahdolliset hajulähteet. Mallinnuksen avulla voidaan arvioida hajun esiintymistiheyttä ja voimakkuutta hajuyksikköinä eri puolilla arvioitavaa kohdetta.

## 8.2 Hule- ja jätevedet

Hulevesiä muodostuu laitoksen piha-alueilta sekä rakennusten ja säiliöiden katoilta sateiden yhteydessä. Laitosalue on yleensä asfaltoitu ainakin osittain ja etenkin likaantuvien alueiden osalta. Päälylystäminen



helpottaa piha-alueen puhtaana pitoa kuljetusvälineistön mukana kulkeutuvien epäpuhtauksien sekä mahdollisten raaka-aineiden tai lopputuotteen siirtojen tai kiintoaineen kuormausten aiheuttamien likaantumisten yhteydessä.

Hulevedet johdetaan joko ympäristöön tai viemäriin joko tasausaltaan kautta tai suoraan, riippuen paikallisista olosuhteista ja vesien likaisuudesta. Yleensä hulevesien laatua tarkkaillaan vähintään kaksi kertaa vuodessa ulkopuolisen näytteenottajan toimesta. Mikäli laitosalueen hulevedet johdetaan ympäristöön, on erittäin tärkeää pitää laitosalue puhtaana, että sadevedet eivät huuhtelee orgaanista ainetta ja ravinteita vesistöihin. Laitosalueella voi olla myös kaksoisviemäröintijärjestelmä, joka mahdollistaa onnettomuustilanteessa hulevesien keräämisen ja/tai johtamisen viemäriin ympäristöön johtamisen sijasta. Kiinteiden lannoitevalmisteiden varastokenttien hulevedet on johdettava käsittelyyn joko paikan päällä tai viemäriin.

Puhdistamolieteperäinen rejektivesi luokitellaan jätevedeksi ja sitä ei nykyinsäädännön mukaan voi hyödyntää kasvinravinteena. Ko. vesi on siis paikallisista olosuhteista riippuen joko johdettava jätevedenpuhdistamolle suoraan, esikäsiteltävä biokaasulaitoksella ennen puhdistamolle johtamista tai käsiteltävä biokaasulaitoksella erillisellä jätevedenkäsittelyjärjestelmällä loppuun saakka.

Biokaasulaitos voi myös hakea omaa jäteveden johtamislupaa, jolloin ympäristöön johdettavalle vedelle määritellään laatu- ja kuormituskriteerit. Ympäristöön johdettavan puhdistetun veden laatua seurataan ulkopuolisen näytteenottajan toimesta vähintään kerran kuukaudessa. Lisäksi jäteveden johtamisen aiheuttamaa kuormitusta seurataan vesistönäytteenotoin vähintään kaksi kertaa vuodessa. Näytteenottopisteiden määrä riippuu vastaanottavan vesistön ominaispiirteistä.

### 8.3 Muut päästöt

Biokaasulaitos ei yleensä aiheuta merkittävää meluhaittaa ympäristöön. Biokaasulaitoksella paikallisesti melua aiheuttaa lähinnä kaasumoottori, joka sijoitetaan tästä syystä äänieristettyyn tilaan tai konttiin. Tilapäisesti jokin pumppu tai massan siirtolaitteisto voi rikkoutuessaan aiheuttaa lievää melua. Meluhaittana voidaan kuitenkin kokea raaka-aineiden ja lopputuotteiden kuljetuksien aiheuttama liikennemelu. Liikennöinti pyritäänkin hoitamaan yleensä arkipäivisin ja päiväsaikaan. Tästä voi olla määräyksiä myös ympäristöluvassa. Usein ympäristöluvassa edellytetään kuitenkin myös melumittausten suorittamista laitoksen käynnistettyä ja tarvittaessa.

Biokaasulaitoksella on oltava biokaasun käsittelyyn varajärjestelmä, koska metaani on voimakas kasvihuonekaasu ja sitä ei saa päästää ilmakehään. Isommilla laitoksilla varajärjestelmänä on hätäsoihtu, joka käynnistyy automaattisesti kaasun paineen noustessa asetun raja-arvon yli. Soihdussa biokaasun sisältämä metaani poltetaan hiilidioksidiksi. Pienemmillä laitoksilla soihtu voidaan korvata kaasukattilalla, joka on soihtua edullisempi investointikustannuksiltaan.

Biokaasulaitoksilla voi kuitenkin muodostua vähäisiä määriä metaanipäästöjä raaka-aineiden ja mädätysjäännöksen varastoinnista sekä kaasun puhdistusjärjestelmistä. Tästä syystä raaka-aineet on syytä saada prosessointiin mahdollisimman nopeasti, prosessointi on tehtävä hyvin ja mädäte varastoitava kaasutiiviissä varastoaltaassa tai kaasun muodostus lopetettava muilla tavoin. Kaasun puhdistusjärjestelmien metaanipäästöt vaihtelevat jonkin verran käytettävästä tekniikasta riippuen (Luku 7). Laittevalmistajat ilmoittavat hävikiksi yleensä <2 %, mutta mitatut määrät ovat olleet selvästi suurempiakin (Ahonen, 2010).

#### 8.4 Viranomaisvalvonta ja omavalvonta

Biokaasulaitoksen valvonta ja raportointi jakaantuu kahteen pääkohtaan. Ympäristöluvan mukainen valvonta kuuluu toiminnan laajuudesta riippuen joko paikalliselle ympäristöviranomaiselle tai alueelliselle viranomaiselle (ELY-keskus). Laajuuden määrittelee se, onko toiminnan ympäristölupa annettu paikallisen viranomaisen vai aluehallintoviraston (AVI) toimesta. Lisäksi lannoitevalmisteen laadun varmistamiseen liittyvä valvonta kuuluu Elintarviketurvallisuusvirastolle (Evira). Valvonta perustuu omavalvontaan, josta raportoidaan valvontaviranomaisille, mutta sekä paikallinen ympäristöviranomainen/ELY-keskus että Evira tekevät myös viranomaisvalvontakäyntejä.

Ympäristöluvassa annetaan määräykset luvan mukaisen toiminnan valvontaan liittyvistä seurattavista ja mitattavista asioista. Toiminnanharjoittajan on laadittava toimintansa käyttö-, päästö- ja vaikutustarkkailuohjelma sekä jätteen käsittelyn seuranta- ja tarkkailusuunnitelma tai näiden yhdistelmä, jotka hyväksyy lupaa valvova viranomainen. Yhteenvetoraportti näistä tarkkailuista laaditaan vuosittain. Valvontaviranomaisen kanssa voidaan sopia myös useammin laadittavista raporteista tai analyysitulosten toimittamisesta. Yhteenvetoraportissa on raportoitava esimerkiksi seuraavia asioita (Aluehallintovirasto, 2015):

- ✓ tiedot toiminnasta ja käyntiajoista, kaasun tuotannosta ja hyödyntämisestä sekä laitoksen oma energiankulutus
- ✓ tiedot sähkön ja lämmön tuotannosta
- ✓ vastaanotettujen jätteen alkuperä, määrä, laatu, jätenimike, toimittaja ja toimitusajankohta käsittelytoiminnoittain eriteltynä

- ✓ ominaisjättemäärä
- ✓ käsittelyjäännösten ja lopputuotteiden määrä, laatu ja toimituspaikka sekä varastointitilanne vuoden vaihteessa
- ✓ vedenkulutus sekä laimennusvesien laji ja määrä
- ✓ laitoksen toiminnassa syntyneiden jätteiden määrä, laatu, jätenimike, toimittaja, toimituspaikka ja toimitusajankohta sekä varastotilanne vuoden vaihteessa
- ✓ yhteenveto jätevesien laadusta, määrästä ja toimituspaikoista käsittelytoiminnoittain eriteltyinä
- ✓ tiedot päästöistä ilmaan
- ✓ mädätyksen ja jälkikypsytyksen viipymäajat (keskiarvo ja vaihteluväli)
- ✓ selvitys vuoden aikana sattuneista häiriötilanteista ja muista poikkeuksellisista tilanteista, niiden syyt ja kestoajat sekä niiden aikana syntyneet päästöt ja jätteet sekä soihdun käyttöaika
- ✓ vastaanottamatta jätetyn jätteen laatu, määrä, toimittaja ja toimitus-ajankohta sekä vastaanottamattomuuden syy
- ✓ yhteenveto ympäristötarkkailuohjelmien tuloksista ja ympäristön tilan seurannasta sekä niihin perustuva asiantuntija-arvio laitoksen vaikutuksista ympäristöön lyhyellä ja pitkällä aikavälillä
- ✓ vuoden aikana toteutetut tai suunnitteilla olevat muutokset laitoksen toiminnassa
- ✓ muut tämän päätöksen toteutumisen todentamiseksi tarvittavat tiedot

Markkinoille saatettavien lannoitevalmisteiden hyvä laatu ja vaatimusten mukaisuus varmistetaan omavalvonnalla. Lannoitevalmisteita koskeva lainsäädäntö edellyttää, että toiminnanharjoittaja tuntee lannoitevalmisteiden valmistukseen ja käsittelyyn liittyvät kriittiset vaiheet ja valvoo niitä säännöllisesti. Omavalvontasuunnitelmassa kuvataan käsittelyn kriittiset vaiheet ja niiden hallinta sekä miten varaudutaan ja ennaltaehkäistään ongelmatilanteita. Suunnitelmassa on kuvattava myös miten toimitaan, jos valmistuksessa, käsittelyssä tai lannoitevalmistuksessa havaitaan vakava riski. Omavalvontasuunnitelma on siis kirjallinen työ- ja toimintaohje laitoksen henkilökunnalle. Suunnitelma toimitetaan myös Eviraan.

Omavalvontasuunnitelmassa kuvataan prosessin eri vaiheet ja kriittisten valvontapisteiden seurantamenettelyt. Toiminnanharjoittaja määrittää, mitkä ovat prosessissa ne kriittiset vaiheet, jotka vaativat seurantaa turvallisen lopputuotteen takaamiseksi. Kriittisten valvontapisteiden seuranta edellyttää säännöllistä kirjanpitoa. Omavalvontasuunnitelman sisältö on seuraava (Evira, 2012):

- ✓ Toiminnasta vastuussa olevat henkilöt ja henkilökunnan perehdyttäminen
- ✓ Raaka-aineiden vastaanotto
- ✓ Maahantuonti ja sisämarkkinakauppa
- ✓ Eräkohtainen jäljitettävyys
- ✓ Tuotanto- ja toimintaprosessit
- ✓ Häiriötilanteet
- ✓ Laadunvalvonta ja näytteenottosuunnitelma
- ✓ Laatupoikkeamat
- ✓ Varastointi, säilytys ja kuljetus
- ✓ Tuotekehitys- ja koetoiminta

Jatkuvatoimisessa biokaasulaitoksessa ei ole varsinaisia eriä, vaan erät muodostuvat tietystä ajassa tuotetuista lannoitevalmisteista. Jokaisen erän laatu on varmistettava. Eräkohtainen jäljitettävyys on hyvä pitää kohtuullisena, koska mahdolliset laatupoikkeamat voivat aiheuttaa merkittäviä kustannuksia, mikäli iso määrä lannoitevalmistetta osoittautuu markkinoille kelpaamattomaksi tai tuotetta on jo ehtinyt lähteä laitokselta eteenpäin.

## LÄHTEET JA LISÄTIETOA

- Ahonen, S. 2010. Alueellinen liikennebiokaasun tuotanto, siirto ja jakelu – esimerkkitapauksena Keski-Suomen maakunta. Pro gradu -tutkielma. Jyväskylän yliopisto, Bio- ja ympäristötieteiden laitos. 73 s. *Linkki e-julkaisuun.*
- Aluehallintovirasto, 2015. Topinojan biokaasulaitoksen toiminnan muutos, Turku. Ympäristölupa ESAVI/282/04.08/2013.
- Evira, 2012. Omavalvontaohje lannoitevalmistean toimijoille. 6 s. *Linkki e-julkaisuun.*
- Lehtinen, J. 2012. Odorous volatile organic compounds in waste and wastewater management. Jyväskylä studies in Biological and Environmental Science 252. 86 p. + liitteet. *Linkki e-julkaisuun.*
- Makkonen, T. V. 2008. Biovakka Oy:n biokaasulaitoksen hajujen leviämismittaus hajupaneelin avulla. Turun yliopiston merenkulkualan koulutus- ja tutkimuskeskuksen julkaisu B 156. 45 s. *Linkki e-julkaisuun.*
- Tammisto, S. 2014. Biokaasulaitosten hajupäästöt. Opinnäytetyö. Hämeen ammattikorkeakoulu, Bio- ja elintarviketekniikan koulutusohjelma. 38 s. *Linkki e-julkaisuun.*

## 9. Lainsäädäntö ja toiminnan vaatimat luvat

Mikko Saalasti (luvut 9.1 – 9.4 ja 9.7) ja Teija Paavola (luvut 9.5 – 9.6)

Biokaasulaitoshanke vaatii useita viranomaislupia niin suunnittelun, rakentamisen kuin käytön aikana. Lupaprosesseilla varmistetaan, että laitos täyttää lainsäädännön edellyttämät vaatimuksen niin tekniikan, turvallisuuden kuin ympäristönäkökulman osalta. Ensimmäisenä vaiheena suuremmilla laitoksilla on ympäristövaikutusten arviointimenettely (YVA), jolla pyritään vaikuttamaan lopullisen laitoksen ympäristövaikutuksiin jo hyvissä ajoin suunnitteluvaihetta. Ennen rakentamisvaihetta haetaan myös ympäristö- ja rakennusluvut. Normaalisti rakennusvaiheen yhteydessä, kuitenkin ennen käyttöönottoa, haetaan Eviran myöntämä laitoshyväksyntä sekä Tukes:n valvoma kemikaalilain mukainen lupa vaarallisten aineiden varastoinnille. Kemikaalilain mukainen lupa voidaan kuitenkin korvata ilmoituksella, joka tehdään paikalliselle valvovalle viranomaiselle, jos vaarallisten aineiden varastointimäärät alueella jäävät vähäisiksi. Kun laitos on saatu käyntiin ja mädätyksen lopputuotteita valmistuu, haetaan Eviralta myös tuotehyväksyntä, joka vahvistaa tuotteen laadun lainsäädännön mukaiseksi.

### 9.1 Ympäristövaikutusten arviointimenettely (YVA)

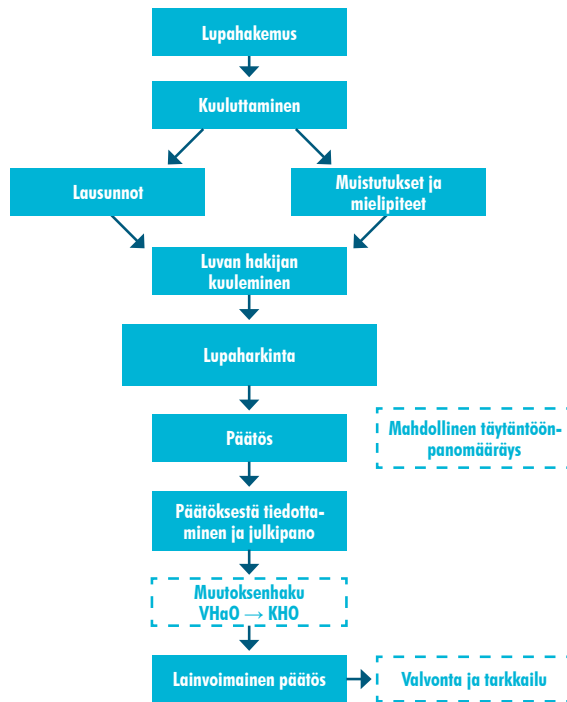
Ympäristövaikutusten arviointimenettelyn (YVA) avulla pyritään vähentämään tai kokonaan estämään hankkeen haitallisia ympäristövaikutuksia. Biokaasulaitoshankkeen ympäristövaikutukset on arvioitava Ympäristövaikutusten arviointimenettelystä annetun lain (468/1994) ja asetuksen (713/2006) mukaisessa laajuudessa. Biokaasulaitoshankkeelle on suoritettava ympäristövaikutusten arviointimenettely asetuksen 2. luvun 6 §:n kohdan 11 b perusteella, kun laitoksen biologisen käsittelykapasiteetti ylittää 20 000 tonnia vuodessa. YVA-menettelyä sovelletaan myös vastaavan määrän laajennuksen kohdalla. YVA-viranomaisena toimii alueellinen elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus. Jos hankkeen vaikutukset ylittävät valtion rajat, järjestetään arviointi yhteistyönä toisen valtion kanssa.

Ympäristövaikutusten arviointimenettelyssä verrataan hankkeen ympäristövaikutuksia nykytilaan ja pyritään luomaan hankkeelle vaihtoehtoisia toteutustapoja. Vaihtoehtoiset toteutustavat voivat olla esimerkiksi

erilaiset sijoituspaikat ja kapasiteetin tai syötteiden muutokset. Samoin lopputuotteiden, biokaasun ja mädätysjäännöksen, käsittely ja loppusijoitus voivat olla vertailtavia toteutustapoja. Oleellista kuitenkin YVA-menettelyssä on, että vertailtavat toteutusvaihtoehdot ovat kaikki toteuttamiskelpoisia ja niitä vertaillaan puolueettomasti.

## 9.2 Ympäristölupa

Ympäristön pilaantumisen vaaraa aiheuttaville toiminnoille tarvitaan ympäristönsuojelulain (527/2014) mukainen lupa, joten biokaasulaitoshanke edellyttää myös ympäristöluvassa voidaan antaa määräyksiä mm. toiminnan laajuudesta, päästöistä ja niiden vähentämisestä. Luvan myöntämisen edellytyksenä on muun muassa, että toiminnasta ei saa aiheutua terveyshaittaa tai merkittävää ympäristön pilaantumista tai sen vaaraa. Ympäristöluvassa lupaviranomaisena toimii alueellinen aluehallintovirasto. Ympäristölupaan liittyviä päätöksiä voidaan tehdä vasta, kun lupaviranomaisella on käytössään hankkeen ympäristövaikutusten arviointiselostus (silloin kun tarpeen tehdä) ja yhteysviranomaisen siitä antama lausunto. Lupaviranomaisen tulee huomioida arviointiselostus ja yhteysviranomaisen siitä antama lausunto ympäristölupapäätöksessä. Kuviossa 9.1 on esitetty ympäristölupakäsittelyn vaiheet kaaviona.



Kuvio 9.1 Ympäristölupakäsittelyn vaiheet kaaviona. Kaavio mukaeltu ymparisto.fi-sivustolta.

### 9.3 Rakennuslupa

Rakennuksen rakentamiseen on oltava rakennuslupa. Rakennuslupa tarvitaan myös sellaiseen korjaus- ja muutostyöhön, joka on verrattavissa rakennuksen rakentamiseen, laajentamiseen tai sen kerrosalaan lasketavan tilan lisäämiseen. Biokaasulaitoksen rakentaminen vaatii yksityiskohtaiset rakennus- ja rakennuttamissuunnitelmat. Näihin edellytetään maankäyttö- ja rakennuslain (132/1999) mukaiset rakennusluvut, jotka myöntää kunnan rakennusvalvontaviranomainen. YVA-selostus ja yhteysviranomaisen antama lausunto liitetään rakennuslupahakemukseen.

Rakennuslupahakemuksen ja liiteasiakirjojen jättäminen samanaikaisesti jouduttaa hakemuksen käsittelyä. Viranomaisten kanssa käytävillä alustavilla neuvotteluilla eli ennakko-ohjauksella on huomattava merkitys. Puutteellisen hakemuksen täydentäminen ja keskeneräisen suunnitelman korjauttaminen pidentävät rakennusluvan käsittelyaikaa. Jos hakemuksessa havaitaan virheitä tai puutteita, asian käsittelijä varaa suunnittelijalle tilaisuuden hakemuksen täydentämiseen, korjaamiseen tai muuttamiseen.

### 9.4 Laitoshyväksyntä

Orgaanisten lannoitevalmisteiden tai niiden orgaanisten raaka-aineiden valmistajalla tai teknisesti käsittelevällä toimijalla täytyy olla Eviran hyväksyntä. Laitoshyväksyntä on tuotantolaitos- tai tuotantolinjakohtainen. Elintarviketurvallisuusvirasto Eviran mukaan laitoshyväksyntä vaaditaan lannoitevalmistelain (539/2006) mukaan kaikilta orgaanisia lannoitevalmisteita valmistavilta laitoksilta. Lisäksi uuden sivutuoteasetuksen (EY) N:o 1069/2009 mukainen laitoshyväksyntä edellytetään kaikilta luokkaa 3 (ruokajäte, kaupan entiset elintarvikkeet, teollisuuden eläinperäinen jäte) ja luokkaa 2 (esim. lanta, itsestään kuolleet kalat) käsitteleviltä laitoksilta.

Hyväksynnän hakijan on osoitettava, että laitoksella syntyy turvallista ja käyttöön soveltuvaa lannoitevalmistetta tai sen raaka-ainetta. Hakemuksessa on kuvattava

- ✓ hygienisoituminen prosessissa
- ✓ raaka-aineen ja hygienisen aineksen erillään pito laitoksella
- ✓ laitoksen puhtaanapito
- ✓ omavalvonnan toteutus ja jäljitettävyys.

Hyväksyntäasian käsittelyn yhteydessä tarkastetaan muun muassa tuotantotilat, prosessin toiminta, omavalvonnan toteutus ja kirjanpito.

Laitoshyväksynnän olennaisin osa on laitokselle laadittu omavalvontajärjestelmä, jonka on perustuttava HACCP-järjestelmään (Hazard Analysis and Critical Control Points = Riskien analysointi ja kriittisten valvontapisteiden valvonta). HACCP-järjestelmällä on tarkoitus päästä kohdentamaan valvonnan voimavarat tuoteturvallisuuden kannalta oleellisimpiin kohtiin, jotta mahdollisesti terveysvaaraa aiheuttavan tuotteen eteneminen kuluttajalle voidaan pysäyttää. Omavalvonnan toteuttamisella hallitaan toimintaan liittyvät elintarvikehygieeniset riskit. Valvontaviranomaisella on velvollisuus antaa ohjeita ja oikeus antaa määräyksiä omavalvonnan toimivuuden varmistamiseksi.

## 9.5 Lannoitekäytössä huomioitava lainsäädäntö

Biokaasulaitoksen mädätysjäätös katsotaan joko raakalannaksi tai lannoitevalmisteeksi laitoksen toimintaperiaatteista riippuen. Maatilakohtaisen biokaasulaitoksen mädätysjäätös katsotaan raakalannaksi, mikäli laitoksella ei käsitellä tilan tai useamman tilan yhteislaitoksen ulkopuolisia jätteitä ja mädätysjäätös hyödynnetään omilla pelloilla. Mikäli laitoksella käsitellään jätteitä ja lannoitevalmisteita luovutetaan tilan ulkopuolelle, katsotaan tämä lannoitevalmisteiden markkinoille saattamiseksi, jolloin lopputuotteiden on täytettävä lannoitevalmistelainsäädännön vaatimukset. Käytännössä kaikki biokaasulaitokset, maatilojen biokaasulaitoksia lukuun ottamatta, saattavat lannoitevalmisteita markkinoille. Tuotetehyväksyntäasioita käsitellään Luvussa 9.6. Ajantasainen tieto lannoitevalmisteista ja lannoitevalmistelainsäädännöstä löytyy Eviran verkkosivuilta [www.evira.fi](http://www.evira.fi) > Kasvit > Viljely ja tuotanto > Lannoitevalmisteet. Eviran sivuilta löytyy myös ajantasainen kansallinen lannoitevalmisteiden tyyppinimiluettelo. Yleisesti ottaen jokaisella markkinoille saatavalla lannoitevalmisteellä on oltava tyyppinimi ja tuotteen on täytettävä ko. tyyppinimen vaatimukset. Erityishuomiota on kiinnitettävä puhdistamolieteperäisten lannoitevalmisteiden hyödyntämiseen, koska niiden viljelykäyttöön liittyy rajoitteita.

Kaikkea lannoitteiden hyödyntämistä maataloudessa säätelee Valtioneuvoston asetus eräiden maa- ja puutarhataloudesta peräisin olevien päästöjen rajoittamisesta vuodelta 2014 eli ns. nitraattiasetus. Tällä asetuksella pannaan täytäntöön vesien suojelemiseksi maataloudesta peräisin olevien nitraattien aiheuttamalta pilaantumiselta annettu Euroopan yhteisöjen neuvoston direktiivi (91/676/ETY) eli ns. nitraattidirektiivi. Nitraattiasetuksella säädellään mm. lannoitevalmisteiden varastointia ja viljelykasvien typen enimmäislannoitusmääriä. Lannan ja orgaanisten lannoitevalmisteiden mukana levitettävä kokonaistypen määrä saa olla enintään 170 kg ha<sup>-1</sup>. Asetuksessa annetaan myös tarkat kasvilajikohtaiset liuoksen typen enimmäismäärät hehtaarille jaoteltuna kivennäismaihin ja eloperäisiin maihin. Syyskuun alusta lähtien tehtävä lannoitevalmistei-



den levitys katsotaan syyslevitykseksi, jolloin liukoista tyyppiä saa antaa enintään 35 kg ha<sup>-1</sup>.

Nitraattiasetuksen lisäksi suurin osa viljelijöistä on sitoutunut noudattamaan maatalouden ympäristökorvausjärjestelmän ehtoja, jotka perustuvat Manner-Suomen maaseudun kehittämissuunnitelmaan. Ohjelmakaudet ovat kuusivuotisia ja nykyinen ohjelmakausi on vuosille 2014 – 2020.

Ympäristösitoumukseen kuuluu koko tilan toimenpiteenä ravinteiden tasapainoinen käyttö, johon kuuluu viljavuustutkimukset, viljelysuunnitelu, lohkokohtaiset muistiinpanot, koulutuspäivä, peltomaan laatutesti ja suojakaistat. Kaikkien ympäristösitoumuksen tehneiden tilojen on noudatettava ympäristökorvauksen perustasoa ja vähimmäisvaatimuksia, joihin kuuluu mm. enimmäislannoitusmäärien noudattaminen. Sitoumusehdoissa määritellään kasvi- ja maalajikohtaiset typen enimmäislannoitemäärät sekä kasvilajikohtaiset pellon viljavuusluokkaan perustuvat fosforin enimmäislannoitusmäärät. Maalajit on jaettu neljään luokkaan, jotka ovat vähämultaiset ja multavat maat, runsasmultaiset maat, erittäin runsasmultaiset maat ja eloperäiset maat. Esimerkiksi ohralla ja kauralla typpilannoitusmäärät vaihtelevat maalajista riippuen välillä 60 – 100 kg ha<sup>-1</sup>. Viljavuusluokkia on seitsemän eli huono, huononlainen, välttävä, tyydyttävä, hyvä, korkea ja arveluttavan korkea. Fosforilannoituksen enimmäismäärät vaihtelevat viljavuusluokasta riippuen välillä 5 – 63 kg ha<sup>-1</sup>. Viljavuusluokissa korkea ja arveluttavan korkea fosforilannoitus on käytännössä kokonaan kielletty lukuun ottamatta perunaa ja sokerijuurikasta. Typpilannoitusmääriä on mahdollista nostaa 10 – 50 kg ha<sup>-1</sup> ja fosforilannoitusmääriä 3 – 6 kg ha<sup>-1</sup>, mikäli saavutettu satotaso on riittävän korkea (ns. satotasokorjaus). Tämä mahdollistaa myös viljakasvien fosforilannoituksen enimmillään 6 kg ha<sup>-1</sup> viljavuusluokassa korkea.

Lisäksi viljelijä voi valita lohkokohtaisia toimenpiteitä, joita ovat mm. lietalannan sijoittaminen sekä ravinteiden ja orgaanisten aineiden kierrättäminen. Lietelannan sijoittaminen -toimenpiteessä tukea voi saada, jos lantaa tai orgaanista lannoitevalmistetta levitetään sijoitusmenetelmiä hyödyntäen vähintään 20 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>. Ravinteiden ja orgaanisen aineen kierrättäminen -toimenpiteessä levitettävän orgaanisen ravinteita sisältävän lannoitteen kuiva-ainepitoisuuden on oltava vähintään 20 % ja levitettävä määrä 15 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> vuodessa. Biokaasulaitosten tuottamat lannoitevalmisteet eivät automaattisesti sovellu näihin toimenpiteisiin, koska niiden ravinnepitoisuudet voivat rajoittaa hehtaarikohtaiset levitysmäärät alle vähimmäismäärien. Ohjelman kautta on mahdollista saada rahoitusta myös tuotantoa tukevien investointitukien kautta mm. lannan käsitteilyyn, prosessointiin ja varastointiin liittyviin investointeihin.

Ympäristökorvausjärjestelmää ja yleisesti viljelijöiden lannoitekäyttöä valvoo Maaseutuvirasto eli Mavi. Ajantasaiset, yksityiskohtaiset ohjeet

maatalouden ympäristökorvausjärjestelmästä löytyvät maaseutuviraston verkkosivuilta osoitteesta [www.mavi.fi](http://www.mavi.fi). Lannoitevalmisteiden maatalouskäyttöön liittyviä asioita on käsitelty myös Luvuissa 6.5 ja 6.6.

## 9.6 Tuotehyväksyntä

Sivutuoteasetuksen (EY 1069/2009) ja lannoitevalmistelain (539/2006) perusteella laitoksella muodostuvien lannoitevalmisteiden markkinointi ja myynti edellyttää Eviran tuotehyväksyntää. Tuotehyväksyntä varmistaa tuotteiden ja valmisteiden turvallisuuden, laadun ja aitouden. Tuotehyväksynnän kriteereinä on, että lannoitevalmisteille on laadittu tuoteselosteet ja niiden hygieeninen laatu on todennettu hyväksytyssä laboratoriossa.

Biokaasulaitoksessa syntyvästä mädätysjäännöksestä voidaan valmistaa erilaisia lannoitevalmisteita riippuen sen käsittelytavasta. Lannoitevalmisteita ovat lannoitevalmistelain (539/2006) mukaan:

- ✓ epäorgaaniset ja orgaaniset lannoitteet
- ✓ kalkitusaineet
- ✓ maanparannusaineet
- ✓ kasvualustat
- ✓ mikrobivalmisteet
- ✓ lannoitevalmisteena sellaisenaan käytettävät sivutuotteet.

Lannoitteella tarkoitetaan aineita tai valmisteita, jotka on tarkoitettu edistämään kasvien kasvua tai parantamaan sadon laatua.

EY-lannoitteella tarkoitetaan yhteisöainsäädännön mukaisia EY-lannoite –merkinnällä varustettuja epäorgaanisia lannoitteita. Tällaisen lannoitteen tulee täyttää asetuksen (EY) N:o 2003/2003 vaatimukset valmistusmenetelmän, ravinnepitoisuuksien ja pakkausmerkintöjen osalta. Suomessa markkinoille saatettavien EY-lannoitteiden ravinnepitoisuudet ilmoitetaan alkuaineina.

Kalkitusaineet ovat epäorgaanisia ja orgaanisia pääosin kalsiumia tai magnesiumia tai molempia alkuaineita sisältäviä aineita tai valmisteita, jotka esiintyvät yleensä oksideina, hydroksideina, karbonaatteina tai silikaateina ja jotka pääasiassa on tarkoitettu poistamaan maan happamuutta.

Maanparannusaineella tarkoitetaan aineita, jotka on tarkoitettu parantamaan maan tai kasvualustan fysikaalista tai biologista tilaa, ja joiden vaikutus perustuu pääasiassa muihin vaikutuksiin kuin kasvinravinteisiin.

Kasvualustat ovat kasvien kasvatukseen tarkoitettuja teknisesti käsiteltyjä kiinteitä tai nestemäisiä aineita, joihin on tai voi olla lisätty muita lannoitevalmisteita.

Mikrobivalmiste sisältää yhtä tai useampaa tunnettua mikrobikantaa, jolla on todettu olevan kasvilaji- tai kasviryhmäkohtainen kasvien kasvua tai ravinnonottoa parantava vaikutus.

Sellaisenaan lannoitevalmisteena käytettävällä sivutuotteella tarkoitetaan lannoitevalmisteena käytettävää teollisuus-, poltto- tai tuotantolaitosten, biokaasu- tai kompostointilaitosten taikka muiden laitosten sekä jätevedenpuhdistamojen tai muun vastaavan toiminnan yhteydessä syntyviä tuotteita.

## 9.7 Kemikaalilain mukainen ilmoitus/lupa

Biokaasun valmistus on maakaasusta annetun asetuksen (551/2009) 2 §:n mukaan muuta toimintaa. Kemikaaliturvallisuutta säädellään vaarallisten kemikaalien ja räjähteiden turvallisesta käsittelystä ja varastoinnista annetun lain (390/2005) sekä asetusten (kuten valtioneuvoston asetus vaarallisten kemikaalien käsittelyn ja varastoinnin valvonnasta 855/2012 ja valtioneuvoston asetus vaarallisten kemikaalien teollisen käsittelyn ja varastoinnin turvallisuusvaatimuksista 856/2012) nojalla.

Kemikaalien vähäistä käsittelyä ja varastointia valvovat pelastusviranomaiset, jolle tehdään ilmoitus vähäisen toiminnan aloittamisesta.

Laajamittaista teollista käsittelyä ja varastointia harjoittavalle tuotantolaitokselle on haettava lupa Tukesilta. Lupa on haettava hyvissä ajoin ennen yksityiskohtaisten toteutusratkaisujen tekemistä ja tuotantolaitoksen rakennustöiden aloittamista.

Vähäinen tai laajamittainen käsittely määritellään laitoksella varastoitavien kaikkien kemikaalien yhteenlaskettavalla suhdeluvulla. Suhdeluku lasketaan asetuksen (855/2012) mukaisesti. Yksistään biokaasua varastoitaessa ilmoituksenvarainen varastointimäärä on 1 tonni ja luvanvarainen määrä 5 tonnia, mikä vastaa biokaasukuutioina noin 570 m<sup>3</sup> ja 2 850 m<sup>3</sup>. Mikäli biokaasua johdetaan putkistossa edelleen muualla käsitettäväksi, putkistoihin ja niihin liittyviin laitteistoihin sovelletaan maakaasuasetusta (551/2009).

Tukes:n oppaassa ”Vaaralliset kemikaalit teollisuudessa” on laajalti lisätietoja lupamenettelystä ja toiminnanharjoittajaa koskevista velvoitteista. Opas on luettavissa Tukes:n verkkosivuilta.

Suomen kaasuyhdistys ([www.kaasuyhdistys.fi](http://www.kaasuyhdistys.fi)) on julkaissut useita oppaita liittyen maa- ja biokaasuun ja kaasuturvallisuuteen. Maakaasukäsikirjassa löytyy kattavasti perusteita metaanin ominaisuuksista ja käytön turvallisuudesta. Yhdistys on laatinut yhdessä Tukesin kanssa myös maakaasun yleiset turvaohjeet ja hätätilanteiden toimintaohjeet sekä suunnitteluohjeen maa- ja biokaasun tankkausasemille. Myös kaasujoneuvojen huoltoon ja korjaukseen löytyy opas. Nämä kaikki julkaisut (käsikirja, ohjeet ja oppaat) ovat ilmaisia ja saatavilla Suomen kaasuyhdistyksen nettisivujen kautta.

## LÄHTEET JA LISÄTIETOA

Elintarviketurvallisuusvirasto Evira. Laitoshyväksyntä ja Lannoitevalmisteet.

*Linkki e-julkaisuun.*

Laki vaarallisten kemikaalien ja räjähteiden käsittelyn turvallisuudesta (390/2005).

*Linkki e-julkaisuun.*

Laki lannoitevalmistelain muuttamisesta (913/2014). *Linkki e-julkaisuun.*

Lannoitevalmistelaki (539/2006). *Linkki e-julkaisuun.*

Maaseutuvirasto, MaVi. Maatalouden ympäristökorvausjärjestelmä. [www.mavi.fi](http://www.mavi.fi)

Maankäyttö- ja rakennuslaki (132/1999). *Linkki e-julkaisuun.*

Suomen kaasuyhdistys. [www.kaasuyhdistys.fi](http://www.kaasuyhdistys.fi)

Suomen kaasuyhdistys. Maakaasukäsikirja. *Linkki e-julkaisuun.*

Suomen kaasuyhdistys, Suunnitteluohje maa- ja biokaasun tankkausasemille.

*Linkki e-julkaisuun.*

Suomen kaasuyhdistys. Maakaasun yleiset turvaohjeet ja hätätilanteiden toimintaohjeet. *Linkki e-julkaisuun.*

Suomen kaasuyhdistys. Kaasujoneuvojen turvallinen huolto ja korjaus.

*Linkki e-julkaisuun.*

Tukes. Kemikaalien ja kaasujen teollinen käsittely. *Linkki e-julkaisuun.*

Tukes. Vaaralliset kemikaalit teollisuudessa. *Linkki e-julkaisuun.*

Valtioneuvoston asetus eräiden maa- ja puutarhataloudesta peräisin olevien päästöjen rajoittamisesta (Nitraattidirektiivin täytäntöönpano) (1250/2014).

*Linkki e-julkaisuun.*

Valtioneuvoston asetus maakaasun käsittelyn turvallisuudesta (551/2009).

*Linkki e-julkaisuun.*

Valtioneuvoston asetus vaarallisten kemikaalien käsittelyn ja varastoinnin valvonnasta (855/2012). *Linkki e-julkaisuun.*

Valtioneuvoston asetus vaarallisten kemikaalien teollisen käsittelyn ja varastoinnin turvallisuusvaatimuksista (856/2012). *Linkki e-julkaisuun.*

Ympäristöhallinnon yhteinen verkkopalvelu. Ympäristölupa. *Linkki e-julkaisuun.*

Ympäristöhallinnon yhteinen verkkopalvelu. Ympäristövaikutusten arviointi. *Linkki e-julkaisuun.*

Ympäristönsuojelulaki (527/2014). *Linkki e-julkaisuun.*

## 10. Biokaasualan historia ja tulevaisuus

Ari Lampinen

### 10.1 Biokaasualan historiaa

#### 10.1.1 Globaali katsaus

Biokaasuteknologian käytön aloituksen varhaisin ajoitus on 3000 eaa Sumeriassa (Deublein & Steinhauser 2008, 27) ja varhaisimmat viitteet kiinalaisissa lähteissä ovat 1600-luvulta eaa (He 2010). Hyvin pitkään biokaasuteknologiaa hyödynnettiin vain lannoitteiden, keittoenergian (Kuva 7.9), lämmön ja valon tuotannossa. Biokaasusähkön tuotanto alkoi 1900-luvun alussa, ensimmäisenä Intiassa, ja liikennepolttoainekäyttö 1930-luvun alussa, ensimmäisenä Saksassa (Lampinen 2013a).

Biokaasuteknologia on nykyään käytössä lähes kaikissa maissa. Kiina on yli 50 miljoonan suuruisella laitoskannallaan johtava maa. Saksaa lukuun ottamatta kaikissa maissa biokaasu tuotetaan kokonaan tai pääasiassa jätteistä ja sivutuotteista. Pääresurssit ovat jätevesi, kaatopaikkakaasu, maatalouden ja teollisuuden jätteet ja sivutuotteet sekä yhdyskuntien kiinteät biojätteet.

EU:ssa tuotettiin biokaasua vuonna 2013 primäärienergiana 156 TWh (EurObserv'ER 2014). Vuoden 2014 lopussa EU:ssa oli toiminnassa noin 17 000 biokaasulaitosta ja 370 biokaasujalostamo; biokaasusähkön tuotantokapasiteetti oli noin 8 200 MW<sub>e</sub> ja liikennebiokaasun tuotantokapasiteetti noin 1 900 MW<sub>pa</sub> (EBA 2015).

#### 10.1.2 Kehitys Suomessa

Biokaasuteknologiaa sovellettiin Suomessa ensin jäteveden biologisessa puhdistuksessa vuonna 1902 koelaitoksessa Helsingissä ja vuodesta 1910 alkaen kaupallisissa laitoksissa Helsingissä ja Lahdessa. Biokaasun hyödyntäminen aloitettiin vuonna 1932, kun Kyläsaaren jätevedenpuhdistamo ja sen yhteyteen rakennettu lietteen mädättämö valmistuivat Helsingissä. Ensimmäinen energiatuote oli kaupunkikaasu, jota käytettiin pääasiassa valaistukseen (Kuva 7.18). Vuonna 1936 käynnistyneessä Helsingin Rajasaaren jätevedenpuhdistamossa aloitettiin biokaasun hyödyntäminen

sähkön ja lämmön yhteistuotannossa. Vuonna 1941 biokaasu saatiin Helsingissä myös liikennepolttoaineeksi. (Lampinen 2012a-b)

Jätevedenpuhdistamojen lietemädättämöt hallitsivat biokaasutuotantoa Suomessa 1990-luvulle asti. Sen jälkeen kaatopaikkakaasulaitokset ovat vastanneet suurimmasta osasta biokaasun tuotannosta. Syynä on ensin Suomen ja sen jälkeen EU:n jätelainsäädännössä käyttöön otettu kaatopaikkakaasun keräysvelvoite, jonka seurauksena kaatopaikkakaasun keräyksestä muodostui yksi suurimmista ympäristöpoliittisista menestystarinoista Suomessa. Nykyään biokaasutuotannon kasvu painottuu yhteismädätyslaitoksiin, joissa käsitellään yhdyskuntien, teollisuuden ja maatalouden kiinteitä biojätteitä ja lietteitä.

Vuonna 1991 perustettu Suomen Biokaasuyhdistys aloitti biokaasulaitosten tuotantotilastojen keräämisen vuonna 1996. Ensimmäinen kansallinen tilasto, Suomen Biokaasulaitosrekisteri, julkaistiin vuonna 1998 sisältäen vuosien 1994–1996 tuotantotiedot. Sen jälkeen on vuoteen 2015 mennessä julkaistu 17 laitosrekisteriä, jotka kaikki ovat saatavissa Suomen Biokaasuyhdistyksen www-sivuilla. Nykyään tiedon keräämisestä ja julkaisemisesta vastaa Itä-Suomen yliopisto. Vuonna 2015 julkaistun 18. rekisterin (Huttunen & Kuittinen 2015) mukaan biokaasulaitoksia oli vuoden 2013 lopussa 86. Näistä 46 oli reaktorilaitoksia ja 40 kaatopaikkalaitoksia. Vuonna 2014 biokaasua tuotettiin ja kerättiin yhteensä noin 0,8 TWh. Loppukulutukseen saatiin lämpöä 455 GWh, sähköä 159 GWh ja liikennepolttoainetta 17 GWh. Soihdutuksen kautta hukattiin 101 GWh.

## 10.2 Biokaasualan tulevaisuudesta

Biokaasualalla on erittäin suuri kasvupotentiaali sekä määrällisesti että laadullisesti. EU-komission asettama tulevaisuuden liikennepolttoaineiden asiantuntijaryhmä antoi vuonna 2011 arvion biokaasun tuotantopotentiaalille (FTF 2011). EU:ssa vuoteen 2020 mennessä teknisesti toteutettavissa oleva biometaanin vuosituotantopotentiaali on 2000–3500 TWh. EU:n biojäteperäisen liikennebiokaasun vuosituotantopotentiaali vuonna 2020 on yli 500 TWh, josta jätevedestä 68 TWh, kiinteästä yhdyskuntabiojätteestä 180 TWh, eläinten lietalannasta 205 TWh ja kaatopaikkakaasusta 60 TWh. Tuulimetaanin ja muiden uusiutuvien metaanilajien potentiaali on kertalukuja biometaania suurempi, mutta ne eivät sisällyneet työryhmän arvioon. Uusiutuvan metaanin resurssit ovat selvästi suuremmat kuin energian kokonaiskulutus sekä Suomessa että koko EU:ssa (Lampinen 2012c, 50–51).

Tulevaisuudessa tuotannon määrällinen kasvu tapahtuu ainakin seuraavia teitä pitkin (näitä käsitellään jäljempänä omissa alaluvuissaan):

- ✓ Prosessin optimointi sekä biokaasun että lannoitteiden tuotannon ja hyödyntämisen parantamiseksi
- ✓ Nykyisten jäteresurssien tehokkaampi hyödyntäminen
- ✓ Uusien resurssien käyttöönotto
- ✓ Sivutuotevalikoiman laajentaminen
- ✓ Termisten tuotantomenetelmien käyttöönotto
- ✓ Muiden uusiutuvien energiaressurssien käyttöönotto

Tuotannon laadullinen kasvu tarkoittaa muiden muassa sitä, että kaasun soihduttaminen lopetetaan ja kaasun käyttöä lämmön erillistuotantoon vähennetään. Kaasua käytetään yhä enemmän jalostusarvo maksimoiden liikenne- ja työkonepolttoaineena Ruotsin tapaan. Vuonna 2014 Suomessa hyödynnetystä biokaasusta (0,6 TWh) liikenteen osuus oli 3 % (Lampinen 2015), mutta Ruotsissa hyödynnetystä biokaasusta (1,6 TWh) liikenteen osuus oli 64 % (Energimyndighet 2015). Lisäksi kaasua käytetään sähkön erillistuotantoon sekä sähkön ja lämmön yhteistuotantoon. Sähkön erillistuotannossa kokonaishyötysuhde on oleellisesti alempi kuin sähkön ja lämmön yhteistuotannossa, mutta sen avulla biokaasua voidaan käyttää keskeytyvien uusiutuvien energiamuotojen (kuten aurinko- ja tuulivoima) varastona, joten uusiutuvan sähkön kokonaismäärää voidaan kasvattaa. Määtysjäännöstä hyödynnetään yhä enemmän tuotteistettuina peltolannoitteina, jolloin sen jalostusarvo maksimoituu.

Koko energiajärjestelmän kannalta biokaasun rooli on suurin silloin, kun sitä käytetään

- ✓ liikennepolttoaineiden tuotantoon tai
- ✓ keskeytyvien uusiutuvien energiamuotojen säätövoimana.

Syynä ensin mainittuun on se, että liikennettä on paljon vaikeampi siirtää toimimaan uusiutuvalla energialla kuin sähkön ja lämmön tuotantoa. Liikenne aiheuttaa suuren energian huoltovarmuusongelman, koska se on edelleen lähes kokonaan raakaöljyn varassa. Liikenne on ainut sektori, joka edelleen kasvattaa kasvihuonekaasupäästöjä ja monet niistä ilman epäpuhtauksista, joiden alentaminen on osoittautunut kaikkein vaikeimmiksi, ovat peräisin liikenteestä. Näistä syistä biokaasua tarvitaan korvaamaan raakaöljyä kaikissa liikennesovelluksissa.

Syynä jälkimmäiseen on se, että aurinko- ja tuulivoima ja muut keskeytyvät uusiutuvat energiavarat muodostavat valtaosan uusiutuvan energian resursseista. Ilman niitä uusiutuvaan energiatalouteen ei voida päästä, mutta niiden käyttö edellyttää energian varastointia. Biokaasu tarjoaa yhden varastointimahdollisuuden.



### 10.2.1 Prosessin optimointi

Vaikka biokaasuteknologialla on pitkä historia, prosessia voidaan parantaa monella tavalla. Biokaasuteknologiaa on perinteisesti pidetty jätteen käsittelymenetelmänä, joten kaasun ja lannoitteiden tuoton maksimointi eivät ole saaneet ansaitsemaansa huomiota. Kaasun bruttotuotannon lisäksi myös nettotuotannolla on paljon varaa kasvaa. Se tarkoittaa biokaasun kulutuksen vähentämistä laitoksen omassa käytössä, esimerkiksi reaktoreiden lämmityksen toteuttamista puulla ja aurinkoenergialla. Mädatysjäännöksen tuotteistaminen ja hyötykäytön tehostaminen sekä rejektivesien käsittelyteknologioiden kehittäminen ovat olennaisia kehityskohteita (Luku 6).

### 10.2.2 Nykyisten jäteresurssien tehokkaampi hyödyntäminen

Biokaasuteknologia on levinnyt hyvin pieneen osaan sen potentiaalisista käyttökohteista (Lampinen 2012a, c–d). Käytön laajentamisen avulla voidaan tehostaa jäteresurssien ravinnesisällön kierrättämistä, mikä on kestävä biotalouden edellytys. Biokaasulaitoksia voitaisiin esimerkiksi rakentaa lähes kaikkien taajamien jätevedenpuhdistamojen yhteyteen. Jätevesilietteiden lisäksi sellaisissa laitoksissa voidaan käsitellä kiinteitä yhdyskuntien, teollisuuden ja maatalouden jätteitä, kuten Kouvolan jätevedenpuhdistamolla tehdään (Kuva 10.1).



Kuva 10.1 Kouvolan jätevedenpuhdistamolla ja Kalmarin maatilalla sijaitsevat biokaasulaitokset ovat esimerkkejä laitoksista, jotka yhteismädättävät monenlaista biojätettä ja tuottavat niistä sekä lannoitteita, sähköä, lämpöä että liikennepolttoainetta. Kuvat: Ari Lampinen

Maatilakohtaiset ja maatalojen yhteiset biokaasulaitokset edustavat suurinta biokaasutekniikan käytön kasvupotentiaalia. Näiden laitosten ei tarvitse rajoittua maatalojen resurssien käyttöön. Esimerkiksi Kalmarin maatilalla Laukaassa sijaitsevassa biokaasulaitoksessa yhteismädätetään nestemäistä (lietelanta) ja kiinteää (kasvijätteet) maatalousjätettä, koti-

talousjätettä ja teollisuuden biojätettä tuottaen niistä liikenne- ja traktori-polttoainetta, sähköä, lämpöä ja peltolannoitteita (Kuva 10.1). Vastaavasti voitaisiin toimia muillakin maataloilla. Toinen vaihtoehto on viedä maati-  
lojen jätteitä esimerkiksi jätevedenpuhdistamojen yhteyteen rakennettui-  
hin biokaasulaitoksiin.

### 10.2.3 Uusien resurssien käyttöönotto

Uudet resurssit voidaan jakaa kolmeen ryhmään:

- ✓ resurssit, joiden käyttö ei edellytä muutoksia nykyisissä biokaasulaitoksissa
- ✓ resurssit, jotka edellyttävät esikäsittelymenetelmiä
- ✓ näiden välimuotona resurssit, jotka eivät edellytä esikäsittelyä, mutta joille niiden käytöstä voi olla hyötyä

On olemassa paljon uusia resursseja, joita voidaan käyttää olemassa ole-  
vissa biokaasulaitoksissa. Näitä ovat esimerkiksi monet vesistöjen, met-  
sien, puutarhojen ja teiden hoidon yhteydessä saatavat bioresurssit. Suu-  
rimman resurssin muodostavat energiakasvit. Peltoenergiakasvien käy-  
töllä on kuitenkin monia ympäristönsuojelurasitteita, jotka muiden muas-  
sa johtavat siihen, että tuotetun biokaasuenergian elinkaaren kasvihuone-  
kaasupäästöt voivat olla korkeat. Siksi niitä voidaan hyödyntää vain rajoi-  
tetusti. Levät muodostavat uuden energiakasviryhmän, jota voidaan hyö-  
dyntää oleellisesti pienemmin ympäristörasittein. Levistä voidaan tuottaa  
monia biopolttoaineita, kuten metaania, etanolia ja biodieseliä. Helpointa  
niiden käyttö on biokaasutekniikalla metaania tuottaen. Tämä johtuu kah-  
desta syystä. Paljon energiaa kuluttavaa kuivausta ei tarvita, kuten etano-  
lin ja biodieselin tuotannossa, koska mädätysprosessi toimii kosteassa ym-  
päristössä. Ja levät voidaan kokonaan hyödyntää, kun etanolia ja biodie-  
seliä voidaan tuottaa vain osasta levien biomassasta.

Olki on hieman ligniiniä sisältävä bioresurssi, jota voidaan tavallisissa bio-  
kaasulaitoksissa hyödyntää, mutta sen hajoaminen kestää kauemmin kuin  
biojätteen.



Kuva 10.2 Olkibiokaasun tuotantolaitos Zörbigissä Saksassa. Kuva: Ari Lampinen

Saksassa olki on liikennebiokaasun tärkein lähde: osa saadaan yhteismädätyksellä ilman esikäsittelyä ja osa pelkästään olkea entsyymiesikäsittelyn jälkeen mädättämällä (Kuva 10.2).

Uusien esikäsittelymenetelmien avulla voidaan hyödynnettäviä resursseja kasvattaa vielä paljon enemmän. Syynä on se, että ligniini ei mädätysprosessissa hajoa, joten puu ja muut paljon ligniiniä sisältävät bioreurssit ovat nykyään AD-teknologian ulottumattomissa. Kuten lahottajabakteerit toimivat luonnossa, ligniini voidaan hajottaa biologisesti entsyymien avulla. Ligniini voidaan hajottaa myös kemiallisesti happojen ja emästen avulla tai termokemiallisesti lämmön avulla.

#### 10.2.4 Sivutuotevalikoiman laajentaminen

Biokaasun tuotantoprosessin päätuotteiden biokaasun ja mädätysjännöksen (Kuvio 7.2) lisäksi saatavissa on useita sivutuotteita, joista hiili-dioksidi on yleisimmin hyödynnetty. Sivutuotteita voidaan erottaa käsittelyprosessin eri vaiheissa. Sivutuotteiden määrään ja laatuun voidaan vaikuttaa syötteiden valinnoilla ja reaktorin prosessia voidaan optimoida sivutuotteiden lisäämiseksi.

#### 10.2.5 Termisten tuotantomenetelmien käyttöönotto

Termisillä menetelmillä voidaan valmistaa biokaasua vastaavaa metaanipolttoainetta. Tuotettavaa kaasua kutsutaan synteettiseksi biokaasuksi (SBG = Synthetic BioGas) erotuksena mädätyksen avulla valmistettavaan biokaasuun (BG = BioGas). Tärkein synteettisen biokaasun valmistusmenetelmä pohjautuu termiseen kaasutukseen ja sitä seuraavaan metaanisynteesiin. Tämä teknologia otettiin demonstraatiokäyttöön ensimmäisenä Itävallassa vuonna 2009 (Kuva 10.3) ja kaupalliseen käyttöön ensimmäisenä Ruotsissa vuonna 2014. Pääresurssi synteettisen biokaasun tuotannossa on puu. (Lampinen 2013c)



### 10.2.6 Muiden uusiutuvien energiaresurssien käyttöönotto

Edellä on puhuttu vain bioenergiaresurssien käytöstä. Biometaanin vastaavaa metaanipolttoainetta on kuitenkin mahdollista valmistaa myös kaikkien muiden uusiutuvien energiamuotojen avulla (Kuvio 7.1). Koska esimerkiksi aurinko- ja tuulienergia voidaan hyödyntää, uusiutuvan metaanin kokonaisresurssit ovat erittäin paljon biometaanin resursseja suu-remmat: globaalit bioenergiaresurssit ovat vain 0,002 % uusiutuvan energian kokonaisresursseista (UN 2000, 152 – 168).



Kuva 10.3 SBG:n tuotanto- ja tankkauspaikka Güssingissä Itävallassa. Kuva: Ari Lampinen

Tärkein menetelmä muiden uusiutuvien metaanilajien valmistukseen pohjautuu Sabatier-reaktorin (Kuva 7.21) hyödyntämiseen. Valmistettaessa esimerkiksi tuulimetaania metaani syntetisoidaan hiilidioksidista ja tuulivedystä, joka on valmistettu elektrolyyttisesti tuulisähköllä vedestä. Hiilidioksidi voidaan esimerkiksi imeä ilmakehästä, erottaa savukaasusta tai hyödyntää biokaasureaktoreiden sivutuotteena saatavaa hiilidioksidia. Saksa on tämän teknologian pioneerimaa. Aurinkometaanin tuotanto aloitettiin siellä demonstraatiokokoluokassa vuonna 2009 (Kuva 10.4) ja kaupallinen tuulimetaanin tuotanto aloitettiin vuonna 2013 hyödyntäen biokaasun sisältämää hiilidioksidia ja Itämeren tuulivoimaa. (Lampinen 2013b)



Kuva 10.4 Tuulimetaanin tankkausta Saksassa Sabatier-reaktorin sisältävästä kontista. Kuva: Ari Lampinen

Uusiutuvan metaanin tuotanto mahdollistaa metaaniverkoston hyödyntämisen aurinko- ja tuulienergian kemiallisena varastona. Sen avulla nämä energiamuodot voivat saavuttaa suuren osuuden energian kulutuksesta. Esimerkiksi Saksassa metaaniverkon varastointikapasiteetti on yli 200 TWh, kun sähköverkon varastointikapasiteetti pumppuvoimaloiden ja paineilmaparastojen avulla on vain 0,04 TWh. Uusiutuva metaanitalous voi siten toimia keskiössä kehityksessä kohti uusiutuvaa energiatuotantoa. (Lampinen 2012d)

## LÄHTEET JA LISÄTIETOA

Deublein, D. ja Steinhäuser, A. 2008. Biogas from Waste and Renewable Resources. Wiley-VCH. 443 p.

EBA, 2014. Biogas Report 2014. European Biogas Association, 29 p.

Energimyndighet, 2015. Produktion och användning av biogas och rötresten år 2014. Statens energimyndighet, 24 s. *Linkki e-julkaisuun.*

EurObserv'ER, 2014. Biogas barometer. EurObserv'ER, 12 p. *Linkki e-julkaisuun.*

FTF, 2011. Future Transport Fuels. Report of the European Expert Group on Future Transport Fuels, 81 p. *Linkki e-julkaisuun.*

He, P.J. 2010. Anaerobic digestion: An intriguing long history in China. Waste management 30:549-550.

Huttunen, M.J. ja Kuittinen, V. 2015. Suomen biokaasulaitosrekisteri n:o 18 – Tiedot vuodelta 2014. Publications of the University of Eastern Finland, Reports and Studies in Forestry and Natural Sciences No 21, School of Forest Sciences, Faculty of Science and Forestry, University of Eastern Finland, 45 s. *Linkki e-julkaisuun.*

Lampinen, A. 2012a. Biokaasun käyttöä Suomessa 80 vuotta. Biokaasu 4(1)10-14. *www.biokaasuyhdistys.net*

Lampinen, A. 2012b. Liikennebiokaasun käyttöönotto Suomessa. Tekniikan Waiheita 30(1)5-20.

Lampinen, A. 2012c. Tiekartta uusiutuvaan metaanitalouteen – Sektoriraportti liikenne- ja viestintäministeriön työryhmälle Tulevaisuuden käyttövoimat liikenteessä. Pohjois-Karjalan liikennebiokaasuverkoston kehityshanke ja Suomen Biokaasuyhdistys ry. Pohjois-Karjalan liikennebiokaasuverkoston kehityshankkeen julkaisuja 1/2012, 133 s. *www.biokaasuyhdistys.net*

- Lampinen, A. 2012d. Kohti uusiutuvaa metaanitaloutta. *Biokaasu* 4(2)15-20.  
*www.biokaasuyhdistys.net*
- Lampinen, A. 2013a. Development of biogas technology systems for transport. Tekniikan Waiheita 31(3)5-37.
- Lampinen, A. 2013b. Biometaanin ja tuulimetaanin yhteistuotanto. *Biokaasu* 5(1)18-21. *www.biokaasuyhdistys.net*
- Lampinen, A. 2013c. Synteettinen biokaasu. *Biokaasu* 5(2)25-29.  
*www.biokaasuyhdistys.net*
- Lampinen, A 2015. Liikennebiokaasun tuotanto ja käyttö vuonna 2014. Teoksessa: Huttunen MJ & Kuittinen V (eds.): Suomen biokaasulaitosrekisteri n:o 18 – Tiedot vuodelta 2014. Publications of the University of Eastern Finland, Reports and Studies in Forestry and Natural Sciences No 21, School of Forest Sciences, Faculty of Science and Forestry, University of Eastern Finland, Joensuu, 12-18. *Linkki e-julkaisuun*.
- UN, 2000. World Energy Assessment – Energy and the Challenge of Sustainability. United Nations, 508 p.

## Lyhenteet

Suluissa kappale, missä lyhenne on mainittu ensimmäisen kerran.

ABG	Adsorbed/Absorbed BioGas, <i>adsorboitu/absorboitu biokaasu</i> (7)
AD	Anaerobic Digestion, <i>anaerobinen hajoaminen/mädätys</i> (1)
AMPTS	Automatic Methane Potential Test System, <i>automaattinen metaanipotentialitesti</i> (2)
AVI	<i>aluehallintovirasto</i> (8)
BMP	Biochemical/Biological Methane Potential, <i>biokemiallinen/biologinen metaanipotentialiaali</i> (2)
BG	BioGas, <i>biokaasu</i> (7)
BOD	Biological Oxygen Demand, <i>biologinen hapenkulutus</i> (2)
CAV	Compressed Air Vehicle, <i>paineilma-ajoneuvo</i> (7)
CBG	Compressed BioGas, <i>paineistettu biokaasu</i> (1)
CC	Combined Cycle, <i>kombivoimala</i> (7)
CHP	Combined Heat and Power, <i>yhdistetty sähkön ja lämmön tuotanto</i> (1)
C/N-suhde	<i>hiili-typpisuhde</i>
COD	Chemical Oxygen Demand, <i>kemiallinen hapenkulutus</i> (1)
COD <sub>poistettu</sub>	tarkoittaa käsittelyn aikana poistetun/hajotetun kemiallisen hapenkulutuksen määrää (1)
COD <sub>sol</sub>	soluble Chemical Oxygen Demand, <i>liukoinen kemiallinen hapenkulutus</i> (4)
CSTR	Completely/Continuously Stirred Tank Reactor, <i>täyssekoitteinen reaktori</i> (1)
D-arvo	kuvaa rehun sulavuutta, ts sitä, kuinka suuri osa rehun kuiva-aineesta on eloperäistä, yksikkö $\text{g (kg ka)}^{-1}$ (2)
DEA	<i>dietanoliamiini</i> (7)
DEPG	<i>polyetyyleeniglykolin dimetyylieetteri</i> (7)
DM	dry matter, <i>kuiva-aine</i> (2)

DMDS	<i>dimetyylidisulfidi (8)</i>
DME	<i>dimetyylieetteri (7)</i>
DMS	<i>dimetyylisulfidi (8)</i>
ECE	External Combustion Engine, <i>väliaineiden avulla lämmitettävä mäntämoottori (7)</i>
ECT	External Combustion Turbine, <i>väliaineiden avulla lämmitettävä turbiini (7)</i>
EGSB	Expanded Granular Sludge Bed, <i>lietepatjareaktorista (UASB) modifoitu reaktoriyyppi (1)</i>
ELY-keskus	<i>Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus (8)</i>
Evira	<i>Elintarviketurvallisuusvirasto (6)</i>
FC	Fuel Cell, <i>polttokenno (7)</i>
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle, <i>polttokennosähköauto (7)</i>
FFV	Flexible Fuel Vehicle, <i>flexifuel -auto (7)</i>
GC	Gas Chromatography, <i>kaasukromatografia (4)</i>
HACCP	Hazard Analysis and Critical Control Points, <i>riskien analysointi ja kriittiset valvontapisteet (9)</i>
HCBG	Hydrogen Compressed BioGas, <i>paineistettu biokaasun (metaanin) ja vedyn seos eli hytaani (7)</i>
HEV	Hybrid Electric Vehicle, <i>hybridiajoneuvo (7)</i>
HHV	Higher Heating Value, <i>ylempi lämpöarvo (7)</i>
HPLC	High Performance Liquid Chromatography, <i>korkean erotuskyvyn nestekromatografia (4)</i>
HRT	Hydraulic Retention Time, <i>viipymäaika (4)</i>
HY	<i>hajuyksikkö (8)</i>
ILUC	Indirect Land Use Change, <i>epäsuora maankäytön muutos (1)</i>
IC	Internal Circulation, <i>lietepatjareaktorista (UASB) modifoitu reaktoriyyppi (1)</i>
ICE	Internal Combustion Engine, <i>mäntämoottori (jossa polttoaine palaa koneen sisällä) (7)</i>
ICT	Internal Combustion Turbine, <i>turbiini (jossa polttoaine palaa koneen sisällä) (7)</i>
ka	KA, <i>kuiva-aine (2)</i>



KHO	<i>korkein hallinto-oikeus</i> (9)
LAS	<i>lineaarinen alkyylibentseeni sulfonaatti</i> (4)
LBG	<i>Liquefied BioGas, nesteytetty biokaasu</i> (1)
LCBG-asema	<i>tankkausasema, jossa päävarasto on LBG:nä, josta sitä höyrystetään CBG-välivarastoon</i> (7)
LCFA	<i>Long Chain Fatty Acids, pitkäketjuiset rasvahapot</i> (4)
Luke	<i>Luonnonvarakeskus</i> (2)
MCFC	<i>Molten Carbonate Fuel Cell, sulakarbonaattipolttokenno</i> (7)
MDEA	<i>metyyliidietanoliamiini</i> (7)
MEA	<i>monoetanoliamiini</i> (7)
MeOH	<i>metanoli</i> (7)
MeSH	<i>metyylimerkaptani</i> (8)
MGV	<i>Methane Gas Vehicle, metaaniajoneuvo</i> (7)
MMM	<i>Maa- ja metsätalousministeriö</i> (1)
MOF	<i>Metal-Organic Framework, metalliorganainen kehysrakenne</i> (7)
MRL	<i>maankäyttö- ja rakennuslaki</i> (9)
NG	<i>Natural Gas, maakaasu</i> (7)
Nm <sup>3</sup>	<i>nm<sup>3</sup>, normi kuutiometri, kaasutilavuus normitilassa (273 K eli 0°C, 1 atm)</i>
NMP	<i>N-metyyli-2-pyrrolidoni</i> (7)
NP	<i>nonyylifenolit</i> (6)
NPEO	<i>nonyylifenolietoksylaatit</i> (6)
oDM	<i>organic Dry Matter, orgaaninen kuiva-aine</i> (2)
OLR	<i>Organic Loading Rate, orgaaninen kuormitus [kgVS (m<sup>3</sup>vrk)<sup>-1</sup>]</i> (4)
ORC	<i>Organic Rankine Cycle, orgaanisen kiertoaineen turbiini</i> (7)
PAH	<i>polyaromaattiset hiilivedyt</i> (6)
PBDE	<i>polybromatut difenyylietterit</i> (6)
PC	<i>propyleenikarbonaatti</i> (7)
PCB	<i>polyklooratut bifenyyliit</i> (6)

PCDD/F	<i>polyklooratut dibentso-p-dioksiinit ja furaanit (6)</i>
PFC	<i>perfluoratut alkyylilyhdisteet (6)</i>
PHEV	<i>Plug-in Hybrid Electric Vehicle, ladattava hybridiajoneuvo (7)</i>
PSA	<i>Pressure Swing Adsorption, paineenvaihteluadsorptio (7)</i>
SBG	<i>Synthetic Biogas, synteettinen biokaasu (7)</i>
SNG	<i>Synthetic Natural Gas, synteettinen maakaasu (7)</i>
SOFC	<i>Solid Oxide Fuel Cell, kiinteäoksidipolttokenno (7)</i>
SRT	<i>Solid Retention Time, kiintoaineen viipymäaika (4)</i>
SYKE	<i>Suomen ympäristökeskus (2)</i>
TEM	<i>Työ- ja elinkeinoministeriö (1)</i>
tp	<i>tuorepaino (sama kuin märkäpaino) (2)</i>
TS	<i>Total Solids, kuiva-aine (2)</i>
TSA	<i>Temperature Swing Adsorption, lämpötilanvaihteluadsorptio (7)</i>
Tukes	<i>Turvallisuus- ja kemikaalivirasto (9)</i>
UASB	<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket, anaerobinen ylösvirtauslietepatja (1)</i>
VFA	<i>Volatile Fatty Acids, haihtuvat rasvahapot (4)</i>
VHaO	<i>Vaasan hallinto-oikeus (9)</i>
VOC	<i>Volatile Organic Compounds, haihtuvat orgaaniset yhdisteet (8)</i>
VS	<i>Volatile Solids, orgaaninen kuiva-aine (2)</i>
ww	<i>Wet Weight, märkäpaino (sama kuin tuorepaino) (2)</i>
YVA	<i>ympäristövaikutusten arviointimenettely (9)</i>

## KIRJOITTAJAT

**Jaakkola Urpo** (Luku 3)

Käyttöpäällikkö, DuPont Industrial Biosciences Oy. Laitospäällikkönä Envor Biotech Oy:ssa v. 2009–2014.

**Kapuinen Petri** (Luku 6)

Vanhempi tutkija, Luonnonvarakeskus (Luke), Uudet liiketoimintamahdollisuudet. Lannankäsittely, lannan ja orgaanisten lannoitevalmisteiden käyttö kasvinravitsemuksessa, logistiikka, varastointi ja levitystekniikka; lannoitevalmisteiden valmistus lannasta ja orgaanisista sivuvirroista sekä typpilannoitus.

**Kinnunen Viljami** (Luku 1)

Tutkija (tohtorikoulutettava), Tampereen teknillinen yliopisto, Kemian ja biotekniikan laitos.

**Kymäläinen Maritta** (Luvut 2 ja 4, ja editointi)

Yliopettaja, Hämeen ammattikorkeakoulu (HAMK), Bio- ja elintarviketekniikan koulutusohjelma, sekä Biojalostamoprosessit -tutkimusryhmän vetäjä, HAMK:n Biotalous tutkimusyksikkö.

**Lampinen Ari** (Luvut 7 ja 10)

Biokaasun liikennekäytön vieraileva tutkija ja opettaja, Itä-Suomen yliopisto.

**Luostarinen Sari** (Luvut 2, 3 ja 5)

Erikoistutkija, Luonnonvarakeskus (Luke), Uudet liiketoimintamahdollisuudet. Orgaanisten jätteiden ja sivutuotteiden, erityisesti lannan, kestävän käytön edistäminen ja prosessointiteknologiat.

**Paavola Teija** (Luvut 6, 8 ja 9)

Kehityspäällikkö, Biovakka Suomi Oy

**Pakarinen Outi** (editointi)

FT, Ympäristöteknologia

**Rautio Erkki** (Luku 7)

Laatuauditoija, SMAK Certifiering AB

**Rintala Jukka** (Luku 1)

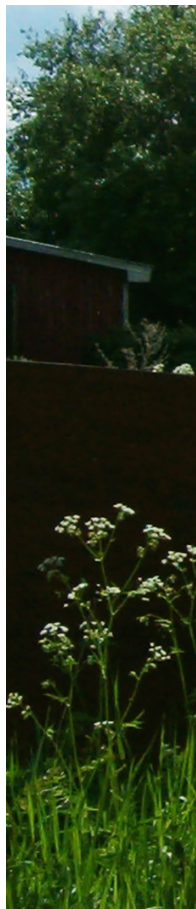
Professori (Bioprosessitekniikka), Tampereen teknillinen yliopisto, Kemian ja biotekniikan laitos.

**Saalasti Mikko** (Luku 9)

Toimialapäällikkö (Jäte ja bioenergia), Doranova Oy

Tässä Biokaasuteknologia-julkaisussa kerrotaan kattavasti biokaasun tuotantoon liittyvistä osa-alueista lähtien raaka-aineista ja päätyen lopputuotteiden, sekä biokaasun että mädätysjäätännöksen, hyödyntämiseen. Kirjan kirjoittamiseen on osallistunut kymmenen alan asiantuntijaa tutkimuksen, koulutuksen ja yritystoiminnan parista.

Kirja on tarkoitettu niin alan opiskelijoille kuin biokaasuteknologian parissa työskentelevillekin. Suomen Biokaasuyhdistys ry on vastannut kirjan tuottamisesta. Kirjan tuottamiseen ja julkaisemiseen on saatu apurahaa Gasum kaaturahastosta, joka on Tekniikan edistämissäätiön (TES) erikoisrahasto.



painettu

ISBN 978-951-784-770-4

ISSN 1795-4231

HAMKin julkaisuja 17/2015

e-julkaisu

ISBN 978-951-784-771-1 (PDF)

ISSN 1795-424X

HAMKin e-julkaisuja 36/2015



9 789517 847704