

Biokaasun tuotantopotentiali Keravan ja Sipoon alueella

**Selvitys raaka-aineiden saatavuudesta ja hyödynnettävyydestä
biokaasun tuotannossa**

LAB-ammattikorkeakoulu
Insinööri (AMK), Energia- ja ympäristötekniikka
Kevät 2021
Soile Immonen

Tiivistelmä

Tekijä(t) Immonen, Soile	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Valmistumisaika Kevät 2021
	Sivumäärä 61 + 1 liite	
Työn nimi Biokaasun tuotantopotentiaali Keravan ja Sipoon alueella Selvitys raaka-aineiden saatavuudesta ja hyödynnettävyydestä biokaasun tuotannossa		
Tutkinto Insinööri (AMK)		
Ohjaavan opettajan nimi, titteli ja organisaatio Jussi Kuusela, lehtori, Energia- ja ympäristötekniikka		
Toimeksiantajan nimi, titteli ja organisaatio Sami Kotimäki, teknologiajohtaja, Keravan Energia Oy		
Tiivistelmä <p>Työn tarkoituksena oli selvittää raaka-aineiden saatavuutta biokaasun tuotantoon Keravan ja Sipoon alueelta sekä näiden hyödynnettävyyttä. Työn taustana oli opinnäytetyöntekijän ja toimeksiantajan yhteinen mielenkiinto selvittää biokaasun tuotantopotentiaalia alueella. Toimeksiantajana toimi Keravan Energia Oy. Tutkimusongelmaksi muodostui raaka-aineiden saatavuus alueelta.</p> <p>Merkittävimpana tiedonkeruumenetelmänä toimi kyselytutkimus, jolla kartoitettiin raaka-aineiden saatavuutta alueelta. Muita käytettyjä menetelmiä olivat erilaiset sähköiset ja kirjalliset materiaalit. Energia-alalla lainsäädäntö on tärkeää, joten se on myös huomioitu työssä.</p> <p>Teoriaosuudessa käsitellään yleisellä tasolla biokaasua, biomassojen käsittelymenetelmiä, biokaasun tuotannon vaiheita, puhdistusta ja jalostusprosesseja, erilaisten biomassojen soveltuvuutta biokaasun tuotantoon sekä biomassojen metaanintuottopotentiaaleja (biokaasun energiasisältö). Työn lopussa käydään läpi tutkimuksen tuloksia samalla niitä tarkastellen. Lisäksi tarkastellaan mahdollisen laitoksen teknistaloudellista edellytystä ja eri tekijöiden vaikutusta biokaasutoimialaan pohditaan PESTEL-analyysillä.</p> <p>Tutkimuksen tulokset osoittavat, että tällä hetkellä erilaisia biomassoja olisi alueelta saatavissa vuodessa noin 1 500 tonnia, jonka teoreettinen metaanintuottopotentiaali on keskimäärin 760 MWh. Potentiaali todettiin realistiseksi. Tarvittavia jatkotutkimuksia ovat muun muassa biomassojen koostumuksen selvittäminen, laitoksen sijainti ja kannattavuus.</p>		
Asiasanat biokaasu, biomassa, energiantuotanto, lanta, biojätteet, biokaasulaitokset		

Abstract

Author(s) Immonen, Soile	Type of Publication Thesis, UAS	Published Spring 2021
	Number of Pages 61 + 1 attachment	
Title of Publication Biogas production potential in the Kerava and Sipoo area Research of the availability and usability of raw materials in biogas production		
Name of Degree Bachelor of Engineering, Energy and Environmental Technology (UAS)		
Name, title and organization of the supervising teacher Jussi Kuusela, Senior Lecturer, Energy and Environmental Technology		
Name, title and organization of the client Sami Kotimäki, Technology Manager, Keravan Energia Oy		
Abstract <p>The purpose of this thesis was to study the availability of raw materials for biogas production in the Kerava and Sipoo area. The background of the thesis was the shared interest of the thesis worker and the client in determining the biogas production potential in the area. The client of the thesis was Keravan Energia Oy. The availability of the raw materials from the area became the research problem of the thesis.</p> <p>The most significant data collection method was a survey which was used to examine the availability of raw materials. Other methods used were various electronic and written materials. In the energy sector, legislation is important, so it has also been considered in the study.</p> <p>The theoretical part deals with biogas in general, biomass treatment methods, biogas production phases, purification and refining of biogas, the suitability of different biomasses for biogas production, and the methane production potentials of biomasses (energy content of biogas). The end of the thesis presents and analyzes the results of the study. In addition, there is a discussion of the technological and economical prerequisites of the potential biogas plant. The impact of various factors on the biogas industry is analyzed using the PESTEL analysis.</p> <p>The results of the study show that there are currently around 1,500 tonnes of different biomasses available in the area each year. This amount of biomass has an average theoretical methane production potential of 760 MWh. The potential was found to be realistic. Necessary further studies include for example the determination of the properties of the biomasses, the location for the biogas plant, and the profitability of the plant.</p>		
Keywords biogas, biomass, energy production, manure, biowaste, biogas plants		

Sisällys

1	Johdanto.....	1
2	Työn tausta.....	3
2.1	Tutkimusasetelma.....	3
2.2	Käytetyt menetelmät.....	3
3	Lainsäädännön vaikutus biokaasulaitoksen toimintaan ja tukipolitiikka	5
4	Biokaasu.....	7
4.1	Yleistä biokaasusta.....	7
4.2	Biomassan esikäsittely	7
4.3	Anaerobinen hajoamisprosessi.....	9
5	Biokaasun tuotanto.....	12
5.1	Raaka-aineiden sopivuus ja saatavuus.....	12
5.2	Biokaasuprosessi.....	13
5.2.1	Märkä- ja kuivaprosessi.....	14
5.2.2	Jatkuvatoimiset prosessit ja panosprosessi	15
5.2.3	Yksi- ja kaksivaiheinen prosessi	18
5.3	Biomassojen yhteiskäsittely sekä yhteiskäsittelylaitos	19
5.4	Mädätysjäännös	20
6	Biokaasun puhdistus ja jalostus biometaaniksi	22
6.1	Yleistä biokaasun puhdistuksesta ja jalostuksesta.....	22
6.2	Puhdistusprosessi.....	24
6.3	Jalostustekniikat	26
6.4	Biometaanii liikennekäytössä.....	36
7	Biokaasun tuotantoon soveltuvia biomassoja ja niiden ominaisuuksia	39
7.1	Yleistä biomassoista	39
7.2	Lanta	39
7.3	Peltobiomassat	40
7.4	Teollisuuden sivuvirrat.....	41
7.5	Biomassojen metaanintuottopotentiaaleja.....	42
8	Tulokset ja tulosten tarkastelu.....	46
8.1	Saatavan biomassan raaka-aineet ja määrä.....	46
8.2	Biokaasulaitostekniikasta.....	48
8.3	Saatavien biomassojen metaanintuottopotentiaali	50
8.4	Teknistaloudelliset edellytykset.....	55
8.5	PESTEL-analyysi.....	57

9 Yhteenveto	59
Lähteet	61

Liitteet

Liite 1. Kyselytutkimus

Sanasto

absorptio	atomi tai molekyyli kiinnittyy nesteeseen, kaasuun tai kiinteään aineeseen ilman kemiallista reaktiota
adsorptio	kaasumainen aine tai neste kiinnittyy kiinteään aineen pintaan
anaerobinen	hapeton
asetogeneesi	hapettomissa olosuhteissa tapahtuva etikkahapon eli asetaatin mikrobiologinen tuotto
asetogeeni	hiilidioksidista ja vetykaasusta tai orgaanisista yhdisteistä etikkahappoa eli asetaattia tuottava bakteeri
asidogeneesi	happokäyminen
bar	baari, paineen yksikkö
CH ₄ -pot	metaanintuottopotentialiaali
CO ₂	hiilidioksidi
COD	kemiallinen hapenkulutus
desorptio	atomit, molekyylit tai ionit vapautuvat aineen pinnalle tai pintaan kiinnittyneiden molekyylien irtoamisprosessi
H ₂	vety
halogeeni	alkuaine (esimerkiksi fluori, kloori, bromi)
H ₂ S	rikkivety
hydrolyysi	kemiallinen reaktio, jossa vettä käytetään hajottamaan kemiallisia sidoksia
inerti	tehoton, reagoimaton eli aine, joka ei reagoi kemiallisesti muiden aineiden kanssa
inhiboida	estää
J / kg	energiasisältö, joulea / kilogramma

J / m ³	joulea / kuutio, energiasisältö
kWh	kilowattitunti, energiasisältö, eli kuinka paljon energiaa kuluu tunnissa tai paljonko saadaan energiaa
kWh / ha	kilowattituntia hehtaarissa
kWh / m ³	kilowattituntia kuutiossa
kWh / Nm ³	kilowattituntia normikuutiossa
metanogeeni	metaania tuottava
mikrobiympäristö	anaerobisen mädätysprosessin läpikäynyt mädäde, jota käytetään biokaasun tuotannon käynnistämiseen
m ³	kuutio, tilavuuden yksikkö
m ³ / tn	kuutiota / tonni
MJ / m ³	megajoule / kuutio, energiasisältö
MWh	megawattitunti
Nm ³	raakakaasukuutio normaalipaineessa ja 0 °C lämpötilassa, kaasun tilavuusyksikkö
Nm ³ CH ₄	raakakaasukuutio metaania
pestisidi	tuhoeläinten, -sienien tai rikkakasvien torjuntaan käytettävä kemikaali
pH	happo / emästasapanoa ilmaistaan pH-arvoilla (0–14), 7 on neutraali, alle 7 hapan ja yli 7 emäksinen
siloksaani	polymeerisiä yhdisteitä, ovat stabiileja eivätkä reagoi helposti
stabilointi	vakauttaminen, tasapainottaminen
syöte	biomassa / orgaaninen aines, jota käsitellään biokaasulaitoksessa
TS	total solids, kokonaiskiintoaineet

terminen	lämpöä koskeva, lämpö-
termodynamiikka	fysiikan ja kemian tieteenala, joka tutkii energian siirto- ja muuntoprosesseja
VFA	volatile fatty acids, haihtuvat rasvahapot
VS	volatile solids, haihtuva kuiva-aine

1 Johdanto

Tässä opinnäytetyössä tarkoituksena oli tutkia biokaasun tuotantoon tarvittavien raaka-aineiden saatavuutta paikallisilta toimijoilta, joilla syntyy esimerkiksi erilaisia hyödyntämättömiä pelto- ja kasvibiomassoja, puutarhajätettä tai lantaa sekä saatavien biomassojen hyödynnettävyyttä biokaasun tuotantoon. Työn taustana oli toimeksiantajan ja opinnäytetyöntekijän yhteinen mielenkiinto selvittää biokaasun tuotantopotentiaalia Keravan ja Sipoon alueella. Toimeksiantajana toimi Keravan Energia Oy, joka pohtii toiminta-alueellensa biokaasun tuotantoa liikennekäyttöön. Tutkimusongelmana oli, että saadaanko alueelta tarpeeksi biomassoja biokaasutoiminnan aloittamiseksi.

Raaka-aineiden saatavuutta kartoitettiin kohderyhmälle tehtävällä sähköisellä kyselytutkimuksella. Kohderyhmäksi tutkimukseen valittiin Keravan ja Sipoon alueen yrittäjät yksityisten ihmisten sijaan, koska alueella on jo olemassa jätehuollon yrityksiä, jotka keräävät alueen asukkailta biojätteitä. Kyselytutkimus julkaistiin 19.2.2021 ja se oli avoinna 26.3.2021 saakka. Kyselyyn vastasi yhteensä kahdeksan yritystä. Muita käytettyjä tiedonkeruumenetelmiä olivat erilaiset sähköiset ja kirjalliset materiaalit. Nämä muodostivat tärkeän tietopohjan opinnäytetyölle, jotta pystyttiin arvioimaan ja analysoimaan saatuja tuloksia. Lainsäädäntö on tärkeä osa energia-alaa, joten se otettiin myös huomioon.

Työssä tutustutaan yleisellä tasolla biokaasuun ja biomassan käsittelymenetelmiin, minkä jälkeen tarkastellaan biokaasun tuotannon eri vaiheita sekä biokaasun puhdistus- ja jalostusprosesseja. Tämän jälkeen käydään lyhyesti läpi miten erilaiset biomassat soveltuvat biokaasun tuotantoon ja millaisia metaanintuottopotentiaaleja (biokaasun energiasisältö) niillä on. Teoriaosion jälkeen käydään läpi työn tuloksia samalla niitä tarkastellen. Tuloksissa käydään läpi raaka-aineiden saatavuus ja määrä, niiden hyödyntäminen biokaasuprosessissa sekä saatavien biomassojen metaanintuottopotentiaali. Saatavien biomassojen käsittelyyn pohditaan tekniikaltaan erilaisia laitosvaihtoehtoja sekä biokaasun puhdistus- ja jalostusmenetelmiä. Lisäksi työssä pohditaan laitoksen teknistaloudellista edellytystä ja PESTEL-analyysin avulla mietitään eri tekijöiden vaikutusta biokaasutoimialalla.

Tutkimuksen tuloksena todettiin, että Keravan ja Sipoon alueelta on saatavissa biomassoja biokaasun tuotantoon pienessä kokoluokassa, jos kustannukset pysyvät kohtuullisina ja saadaan investointitukea. Tällä hetkellä erilaisia biomassoja biokaasun tuotantoon olisi saatavilla vuodessa noin 1 500 tonnia, joiden teoreettiseksi metaanintuottopotentiaaliksi laskettiin keskimäärin 760 MWh vuodessa. Tämän tuloksen todettiin olevan realistinen verrattaessa sitä toisen samantyyppisiä biomassoja käsittelevän biokaasulaitoksen tuotantoon.

Alueen yrittäjät olivat myös kiinnostuneita biokaasuyhteistyöstä Keravan Energian kanssa, kun toiminta on yrityksiä hyödyttävää. Tutkimuksia tulisikin vielä jatkaa muun muassa biokaasulaitoksen toteuttamispotentiaalin selvittämisestä alueelle, koska biokaasuyhteistyöstä kiinnostuneita yrittäjiä voi olla enemmänkin ja tämä tutkimus ei suoraan sovellu käytettäväksi apuna biokaasulaitosinvestointia mietittäessä. Muita tarvittavia jatkotutkimuksia ovat muun muassa biomassojen koostumuksen selvittäminen, laitoksen sijainti, logistiikka, kannattavuuslaskelmat ja paljon muita.

2 Työn tausta

2.1 Tutkimusasetelma

Opinnäytetyön taustana on toimeksiantajan ja opinnäytetyön tekijän yhteinen mielenkiinto biokaasun tuotantopotentiaalin selvittämisestä Keravan ja Sipoon alueella. Alueella ei vielä ole biokaasun tuotantoa ja potentiaalisesti parhaimmat edellytykset biokaasulle on liikennekäytössä.

Työssä tutkimusongelmaksi muodostui alueelta raaka-aineiden saatavuus biokaasuntuotantoon. Opinnäytetyön tarkoituksena on kartoittaa Keravan ja Sipoon alueelta mahdolliset saatavat raaka-aineet biokaasun tuotantoon sekä pohtia biokaasulaitoksen potentiaalia ja teknistaloudellista edellytystä.

2.2 Käytetyt menetelmät

Opinnäytetyö voidaan määritellä enemmän kvalitatiiviseksi tutkimukseksi kuin kvantitatiiviseksi. Merkittävin tiedonkeruumenetelmä oli kohderyhmälle toteutettu kyselytutkimus. Muita tiedonkeruumenetelmiä olivat erilaiset sähköiset ja kirjalliset materiaalit, joihin perehdyttiin tietopohjan kartuttamiseksi. Nämä muodostavat tärkeän pohjan opinnäytetyölle, koska tutustumalla hyvin aiheeseen, voidaan paremmin ymmärtää biokaasuprosessia ja arvioida alueelta saatavien raaka-aineiden sopivuutta biokaasun tuotantoon sekä analysoida lopputulosta. Lainsäädäntö on tärkeä osa energia-alaa, joten se on myös huomioitu työssä.

Kyselytutkimus

Kyselytutkimus toteutettiin online-kyselynä Keravan Energian omilla internet-sivuilla. Kohderyhmänä olivat maatilat, puutarhat, marja-/kasvivilat ja ruokateollisuuden toimijat, jotka toimivat Keravan ja Sipoon alueella. Lisäksi toteutettiin sähköpostiviestit alueen yrityksille, minkä tarkoituksena oli löytää kohdennetusti potentiaalisia kohderyhmäläisiä vastamaan kyselyyn. Kysely julkaistiin 19.2.2021 ja se oli avoinna 26.3.2021 saakka. Vastauksia saatiin yhteensä kahdeksan kappaletta. Apuna kyselytutkimuksen mainonnassa käytettiin sosiaalista mediaa, minkä oletetaan tuoneen loppuvaiheessa kyselyyn muutaman vastaajan lisää.

Kyselytutkimuksen kohderyhmäksi valikoitui yritykset yksityisten ihmisten sijaan, koska alueella on jo olemassa jätehuollon yrityksiä, jotka keräävät alueen asukkailta biojätteitä. Sipooissa on lisäksi hyvin laajasti peltoaluetta, jolla arvioitiin olevan potentiaalisia yrityksiä biokaasun tuotannon kannalta.

Kyselytutkimuksella (liite 1) kartoitettiin biokaasun tuotantopotentiaalin kannalta olennaisimpia asioita (määrä, biomassan koostumus ja raaka-aineet), joilla on vaikutusta siihen, voidaanko alueelle mahdollisesti rakentaa biokaasulaitos. Lisäksi kysyttiin yritysten kiinnostusta lähteä mukaan tuottamaan mahdolliselle biokaasulaitokselle raaka-ainetta ja mitä hyötyä yritykset toivoisivat saavansa yhteistyöstä Keravan Energian kanssa. Opinnäytetyötä taustoitettiin kohderyhmälle Keravan Energian omilla verkkosivuilla 19.2.2021 julkaistussa artikkelissa, jossa kerrottiin biokaasun tuotantopotentiaalin selvitysvaiheesta sekä opinnäytetyön tekijästä.

Kyselytutkimukseen vastasi yhteensä kahdeksan yritystä, mutta suhteessa vastaajamäärään yritysten toiminnassa syntyy huomattava määrä sivuvirtabiomassaa. Pääosin yrityksessä syntyy joitakin kymmeniä tonneja biomassaa vuodessa, yhdellä isolla toimijalla jopa satoja tonneja biomassaa vuodessa. Kyselyyn vastanneet olivat myös pääosin halukkaita tekemään yhteistyötä Keravan Energian kanssa biokaasutoiminnassa. Kyselytutkimuksella saatiin niin opinnäytetyön kuin Keravan Energian kannalta positiivinen tulos tutkimusongelmaan, joka oli raaka-aineiden saatavuus Keravan ja Sipoon alueelta.

3 Lainsäädännön vaikutus biokaasulaitoksen toimintaan ja tukipolitiikka

Biokaasulaitoksen toimintaan vaikuttavat useat eri lait ja asetukset. Laitoshankkeen suunnittelu vaiheessa sekä rakentamisen ja käytön aikana tarvitaan myös useita viranomaisluvia. Lupaprosesseilla varmistetaan lainsäädännön edellyttämät vaatimukset, jotka koskevat laitoksen tekniikkaa, turvallisuutta ja ympäristöä. Ennen laitoksen rakentamista, jos kyseessä on suurempi laitos, tarvitsee tehdä laitospöytäkirjan ympäristövaikutusten arviointi (YVA), jonka tarkoituksena on arvioida valmiin laitoksen ympäristövaikutuksia jo ennen suunnittelua. Ennen rakennusvaihetta tarvitsee myös hakea ympäristö- ja rakennusluvut. Yleensä rakennusvaiheessa ennen laitoksen käyttöönottoa haetaan myös laitoshyväksyntä Eviralta sekä lupa vaarallisten aineiden varastointiin Tukes:ilta. Jos laitoksella tuotetaan mädätysjäätännöksestä lopputuotteita, tarvitsee niitä varten hakea tuotehyväksyntä Eviralta. (Saalasti 2015, 181.)

Toiminta, joka voi aiheuttaa ympäristölle vaaraa, tarvitsee ympäristöluvan. Tällainen on myös biokaasulaitoshanke. (Saalasti 2015, 182.) Ympäristölupa on ympäristönsuojelulain (Ympäristönsuojelulaki 27.6.2014/527) mukainen, jota sovelletaan teolliseen ja sellaiseen toimintaan, josta voi aiheutua tai aiheutuu ympäristön pilaantumista ja jätettä. Lakia sovelletaan myös jätteen käsittelyyn.

Biokaasulaitoksen toiminnasta saatavien sivutuotteiden käyttöä sekä hävitystä koskee muun muassa Euroopan parlamentin ja neuvoston asetusta ((EY) N:o 1069/2009), jonka mukaisen hyväksynnän biokaasulaitos myös tarvitsee. Tätä asetusta on lisäksi täydennetty kansallisella lainsäädännöllä, esimerkiksi eläimistä saatavien sivutuotteiden lailla (Laki eläimistä saatavista sivutuotteista 517/2015). Asetuksen 1069/2009 mukaista hyväksyntää haettaessa on osoitettava, että laitoksella syntyvät lannoitevalmisteet tai sen raaka-aineet ovat turvallisia ja soveltuvat käytettäväksi ((EY) N:o 1069/2009). Biokaasulaitoksella syntyvä mädätysjäätännös luetaan raakalannaksi tai lannoitevalmisteeksi, sen mukaan mikä on laitoksen toimintaperiaate. Tähän sovelletaan lannoitekäyttöön tarkoitettua lainsäädäntöä. (Saalasti 2015, 183–184.)

Biokaasun jalostukseen sovelletaan maakaasulakia. Myös biokaasun (80 % tai yli) varastointiin käytetään samoja luparajoja kuin maakaasulle. Biokaasun valmistus, käyttö ja varastointi tapahtuu valtioneuvoston asetuksen 685/2015 mukaisesti. Asetus koskee vaarallisten kemikaalien käsittelyä ja varastoinnin valvontaa. Lupaviranomaisena toimii joko Tukes tai pelastuslaitos sen mukaan, mikä on vaarallisten kemikaalien määrä. Lupa koskee reaktoria, kaasukupua, puhdistusyksikköä, komprimointiyksikköä, pullokonttien täyttämistä ja kattilalaitoksella kaasun polttoa. (Tukes 2021a.)

Laitoksen ulkopuolelle siirrettävään biokaasuun sovelletaan maakaasusetusta 551/2009. Lupa koskee yleensä jakeluputkiston ja käyttöputkiston yhdistelmää. Luvan myöntäjänä toimii Tukes. Biokaasuputkiston ja biokaasulaitoksen rajana toimii yleensä puhdistusyksikkö. Usein biokaasulaitosten yhteydessä on myös tankkauspiste tai -asema. Tankkausasemalle tarvitsee hakea maakaasusetuksen mukainen lupa Tukesilta. Tankkauspisteelle voidaan soveltaa valtioneuvoston asetusta 685/2015. (Tukes 2017.)

Jos maakaasun (biokaasun) varastointimäärä on vähintään 5 tonnia, tarvitsee sen varastoimiseen hakea rakennuslupaa. Maakaasun varastoimisesta tehdään ilmoitus, kun varastoitavan kaasun määrä on yli 0,2 tonnia, mutta alle 5 tonnia. (VNa 551/2009.)

Peltoviljeltyjen raaka-aineiden käyttö liikennepolttoaineena on myös säädeltyä. EU-tasolla on säädetty ILUC-direktiivi ((EU) 2015/1513), jonka tarkoituksena on rajoittaa maankäytön muutoksia, mitkä aiheutuvat epäsuorasti biopolttoaineiden ja -nesteiden käytöstä. Toimenpiteinä maankäytön muutosten rajoittamisesta on asetettu tiettyjen pellolla viljeltyjen raaka-aineiden (vilja-, sokeri- ja öljykasvit) käyttö 7 %:iin liikennepolttoaineiden energiasisällöstä. (Eduskunta 2017.)

Lisäksi on vielä monia muita lakeja ja asetuksia, jotka vaikuttavat biokaasulaitustoimintaan. Lainsäädäntöön tulee perehtyä hyvissä ajoin ennen varsinaisen biokaasulaitoksen rakentamista.

Tukipolitiikka

Suomessa uusiutuvien energiamuotojen käyttäminen on tuettua. Erilaisia tukia ovat uusiutuvan energian ja maatalouden investointituki, syöttötariffi sekä preemiojärjestelmä (Motiva 2021a), joka on kilpailutukseen perustuva tukijärjestelmä (Energiavirasto 2021). Uusiutuvalla energialla tuotettu sähkö voi saada tuotantotukea eli niin sanottua syöttötariffia. Uusiutuviin energiamuotoihin investoimista tuetaan energiatuella ja energiayhtiöiden ohella myös maatalojen biokaasulaitokset voivat saada investointitukea. (Motiva 2021c; Motiva 2021d; Motiva 2021e.)

Energiatukea voidaan myöntää esimerkiksi biokaasulaitokselle, joka edistää uusiutuvan energian tuotantoa ja käyttöä. Biokaasuhankkeet voivat saada investointitukea 25 % vuonna 2021. Tapauskohtaisesti uudelle teknologialle voidaan myöntää korotettua tukea 5 prosenttiyksikön verran. Uusi teknologia voi myös saada korkeamman korotuksen, jos se voidaan perustella teknologian käyttöönoton aiheuttamalla riskillä ja kannattavuustarkastelulla. Uudella teknologialla tarkoitetaan tässä uudenlaisia ratkaisuja, jotka ovat harvinaisia Suomessa ja ovat ensimmäisiä demonstraatiolaitoksia. Energiatukea ei myönnetä hankkeille, jotka on käynnistetty ennen energiatukipäätöstä. (Business Finland 2021.)

4 Biokaasu

4.1 Yleistä biokaasusta

Biokaasua muodostuu, kun mikro-organismit hajottavat orgaanista ainesta hapettomissa olosuhteissa. Orgaanisen aineksen hajotessa anaerobisessa prosessissa syntyy metaania sisältävää biokaasua, jota voidaan hyödyntää sähkön- ja lämmön tuotannossa sekä jalostaa biometaaniksi, jota käytetään ajoneuvojen polttoaineena. (Suomen Biokierto ja Biokaasu ry 2021.)

Biokaasu on enimmäkseen metaania ja hiilidioksidia (Suomen Biokierto ja Biokaasu ry 2021). Metaanipitoisuus riippuu biokaasun tuotantoon käytettävästä raaka-aineesta; esimerkiksi hiilihyaatit ja rasvat eivät tuota hajoamisprosessissa samaa määrää biokaasua, jolloin metaanipitoisuuskin vaihtelee. (Kymäläinen ja Luostarinen 2015, 21) Biokaasussa on metaania 40–70 % ja hiilidioksidia 30–60 %. Lisäksi biokaasu sisältää pieniä määriä muun muassa rikkiyhdisteitä. (Suomen Biokierto ja Biokaasu ry 2021.)

Biomassoja käsitellään erilaisilla fysikaalisilla, kemiallisilla ja biologisilla menetelmillä. Biokaasun muodostus tapahtuu anaerobisessa hajoamisessa eli toisin sanoen mädätyksen aikana. (Jaakkola 2015, 56–57; Kymäläinen 2015, 59.)

4.2 Biomassan esikäsittely

Ensimmäinen vaihe biomassan käsittelyssä on vastaanotto, jonne erilaiset biomassat toimitetaan. Vastaanotosta biojäte siirretään hihnan, ruuvin tai työkoneen avulla esimurskaimiin. Esimurskaimella, tai vaihtoehtoisesti repijällä, hienonnetaan isot kappaleet sekä avataan mahdolliset pakkaukset ja biojätepusseet. Isoilla laitoksilla biomassan murskaaminen, pakkausmateriaalin (rejekti) käsittely, pakkausten avaus sekä liettäminen tapahtuvat erillisinä osaprosesseina. Tämä kokonaisuus muodostaa esikäsittelylinjaston, jolla saavutetaan suurempi kapasiteetti kuin pienemmillä laitoksilla. Pienemmille laitoksille on markkinoilla olemassa erillinen esikäsittelylaitteisto, joka hoitaa kaikki edellä mainitut osaprosessit. (Jaakkola 2015, 52.)

Yleisesti biomassan esikäsittelymenetelmät jaetaan fysikaalisiin, kemiallisiin ja biologisiin menetelmiin. Erilaisia käsittelymenetelmien yhdistelmiä on tutkittu ja käytössä. Uusista menetelmistä on tietoa muun muassa otsonoinnista ja korkeapainekäsittelystä, mutta näitä tarvitsee vielä kehittää ennen kuin ne voidaan ottaa käyttöön teollisessa mittakaavassa. Käsittelymenetelmissä on hyvä ottaa huomioon käsittelyn investointi- ja käyttökustannukset suhteessa saavutettavaan käsittelykapasiteettiin ja / tai kaasuntuotannon lisäykseen. (Jaakkola 2015, 56–57.)

Fysikaaliset menetelmät

Yleisimmät fysikaaliset menetelmät ovat mekaanisia esikäsitteilylaitteita. Muita fysikaalisia menetelmiä ovat termiset käsittelyt, mihin kuuluvat hydrolyysi ja höyryräjäytys. (Jaakkola 2015, 56.)

Mekaanisia laitteita ovat muun muassa hienomurskaimet ja homogenisaattorit. Murskaimet pilkkovat massaa mahdollisimman pieneksi, jolloin massan pinta-ala kasvaa. Tämä on eduksi hydrolyysivaiheessa. Murskausvaiheessa voidaan säätää biomassan kuiva-ainepitoisuutta sopivaksi lisäämällä joukkoon nestettä. (Jaakkola 2015, 56.)

Biokaasulaitoksen hygienisointiyksikkö on terminen menetelmä. Hygienisointiyksikkö sijoitetaan joko ennen tai jälkeen bioreaktorin. Sijoittamalla ennen bioreaktoria, hygienisointiyksikkö rikkoo massan rakennetta ja toimii näin osana esikäsitteilyä. Höyryräjäytys menetelmässä biomassa johdetaan tankkiin. Tankissa höyryn avulla paine nostetaan korkeaksi ja lasketaan nopeasti, mikä saa aikaan massan rikkoutumisen. Termisessä hydrolyysissä puolestaan käytetään korkeaa lämpötilaa (120–200 °C) apuna solujen rakenteen rikkomiseen. Termisissä menetelmissä biokaasun tuotantotehoon vaikuttavat käsittelylämpötila ja käsittelyn kesto sekä raaka-aine. (Jaakkola 2015, 56.)

Kemialliset menetelmät

Kemiallisissa menetelmissä käytetään yleensä joko emäksiä tai happoja. Emäksiä, esimerkiksi kalkkia, natriumhydroksidia tai kaliumhydroksidia, käytetään etenkin lignoselluloosan (kasvibiomassan) esikäsitteilyssä. Emäksillä on selluloosan ja hemiselluloosan hydrolyysiä parantavia vaikutuksia ja ne tekevät ligniinistä liukoista. Suomessa ei käytetä kemiallisia menetelmiä biojätteen ja rasvan käsittelyssä. Lietteen kunnostukseen ja stabilointiin käytetään kemiallisia menetelmiä, esimerkiksi kalkkistabilointia. Lietteen kunnostuksen jälkeen lietettä ei yleensä käytetä enää biokaasuprosessissa vaan se kompostoidaan. Jos syöte on niukkaravinteista, voidaan esikäsitteilyvaiheessa lisätä massaansa lisäravinteita, jotka optimoidaan biokaasureaktorin ravinnetasapainon mukaan. (Jaakkola 2015, 57.)

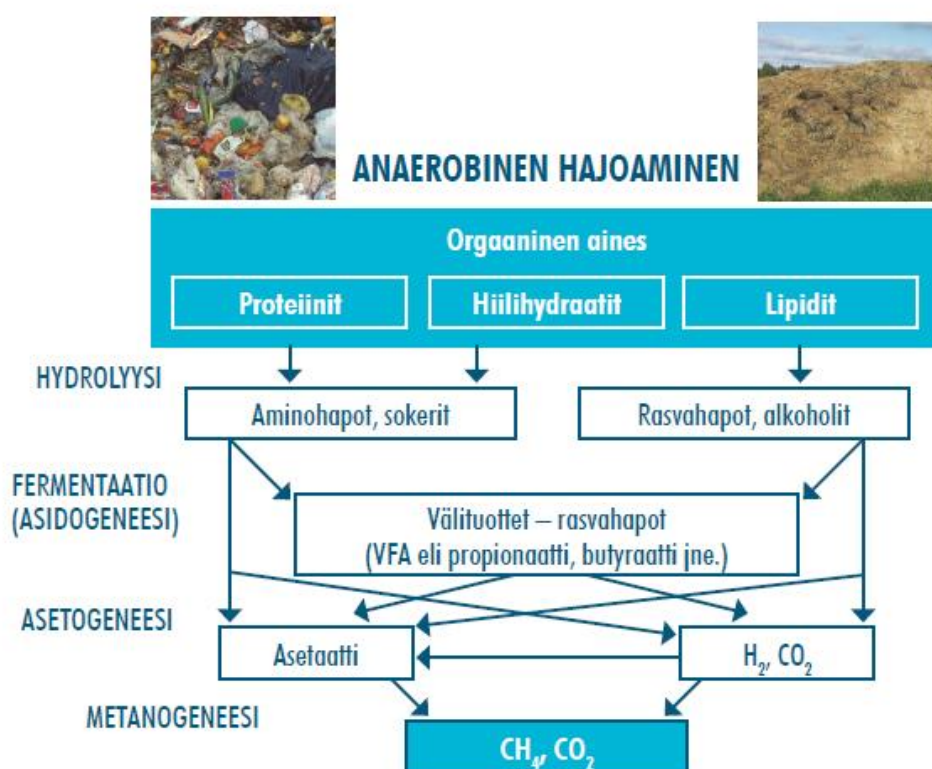
Biologiset menetelmät

Biokaasuprosessin ensimmäisessä vaiheessa hydrolyysi- ja asidogeneesiprosessit optimoidaan sopiviksi, pH 4–6 välillä. Tästä vaiheesta voidaan puhua myös biologisena esikäsitteilyinä. Alhaisessa pH:ssa etenkin tärkkelystä, selluloosaa ja hemiselluloosaa hydrolysoivat entsyymit ovat aktiivisimmillaan. Apuna voidaan käyttää myös korkeaa lämpötilaa.

Varsinainen metaanintuottovaihe (toinen vaihe) toimii mesofiilisena (33–35 °C). (Jaakkola 2015, 57.)

4.3 Anaerobinen hajoamisprosessi

Biokaasua syntyy anaerobisessa hajoamisprosessissa ja jäljelle jäänyttä hajoamatonta ainesta nimitetään mädätysjäännökseksi. Hajoamisprosessissa erilaiset mikro-organismit ovat riippuvaisia toisistaan: edellisessä vaiheessa hajonneet tuotteet toimivat seuraavassa vaiheessa syötteinä. Mikro-organismien toiminnan häiriintyminen johtaa prosessihäiriöihin ja heikentää näin biokaasutuotantoa. Hajoamisprosessin tulisi olla tasapainoinen ja vaatii näin ollen tiettyjä olosuhteita, joita ovat esimerkiksi hapettomuus, sopiva lämpötila ja pH. Anaerobisen hajoamisprosessin päävaiheisiin kuuluvat hydrolyysi, asidogeneesi (fermentaatio), asetogeneesi (anaerobinen hajoaminen) ja metanogeneesi (metaanin muodostuminen) (kuvio 1). (Kymäläinen 2015, 59–60.)



Kuvio 1. Anaerobisen hajoamisprosessin vaiheet (Kymäläinen 2015, 59)

Hydrolyysi

Hydrolyysi on hajoamisprosessin ensimmäinen vaihe, jossa suuret orgaaniset molekyylit (esim. proteiinit, rasvat ja hiilihydraatit) pilkkoutuvat ja liukoistuvat. Mikrobisolut eivät pysty sellaisenaan hyödyntämään isoja molekyylejä, joten ne tuottavat ja välittävät solun ulkopuolelle entsyymejä. Mikrobeja, eli bakteereita, jotka tuottavat entsyymejä kutsutaan hydrolyyttisiksi bakteereiksi. Entsyymit tekevät hajotustyön, jossa hiilihydraatit (esimerkiksi tärkkelys) tuottavat sokeria, proteiinit aminohappoja ja rasvat rasvahappoja ja glyserolia. On yleistä, että useat hydrolyyttisiä entsyymejä tuottavat bakteerit osallistuvat seuraavaan hajoamisprosessiin, jota kutsutaan asidogeneesiksi. (Kymäläinen 2015, 61.)

Proteiinien pilkkoutuminen muodostaa ensin lyhytketjuisia peptidejä, ja lopulta syntyy aminohappoja, jotka sisältävät jonkin tai joitain aminoryhmiä. Tämä tarkoittaa korkeita typpi- toisuuksia. Varsinkin eläinperäiset syötteen voivat sisältää paljon proteiineja. (Kymäläinen 2015, 61.)

Asidogeneesi

Asidogeneesivaiheessa syntyy erilaisia happoja (acids). Tässä käymisprosessissa fermentoivat mikrobit käyttävät esimerkiksi aminohappoja, sokereita ja alkoholeja, jolloin muodostuu alkoholeja ja erilaisia orgaanisia happoja, kuten etikka-, voi- ja maitohappoja. Yhteisnimitys näille hapoille on haihtuvat rasvahapot eli VFA (volatile fatty acids). Asidogeneesiproessin tuotoksena muodostuu ammoniakkia (aminohapoista), hiilidioksidia ja vetyä. Fermentoimistyötä tekevät useat mikrobit, jotka ovat osittain samoja kuin hydrolyysivaiheessa. Asidogeneesi-vaiheesta muodostuu erilaisia tuotekoostumuksia, jotka vaihtelevat syötteen, olosuhteiden ja mikrobipopulaation mukaan. Olosuhteista ja fermentoivasta bakteerista riippuen esimerkiksi glukoosi tuottaa erilaisia lopputuotteita, kuten etikka-, voi-happoa, CO₂ ja H₂. (Kymäläinen 2015, 62.)

Asetogeneesi

Asetogeneesi-vaiheessa tuotetaan metaanin tuotannon raaka-aineita (asettaatti, H₂ ja CO₂) edellisen vaiheen tuotteista, kuten haihtuvista rasvahapoista (VFA). Anaerobisessa hapettumisessa reaktioihin osallistuu hapettuneet yhdisteet, esimerkiksi nitraatit, sulfaatit ja karbonaatit. (Kymäläinen 2015, 62.)

Asetogeneesi-vaiheelle on tyypillistä asetogeenisten bakteerien toimiminen symbioosissa vetyä kuluttavien metanogeenien kanssa. Tämä on niin kutsuttu syntrofisin yhteys asetogeenien ja metanogeenien välillä, missä muodostuu vetyä kuluen tasapainoisesti. Asetogeenien toimintaa estää korkea vety-pitoisuus, joten metanogeenilla on tärkeä tehtävä

muuntaa vetyä metaaniksi tehokkaasti. Tähän vaikuttaa myös reaktioiden termodynamiikka. (Kymäläinen 2015, 62.)

Metanogeneesi

Hajoamisen viimeinen vaihe on metanogeneesi, jossa metanogeenit tuottavat metaania ja hiilidioksidia asetaatista, vedystä ja hiilidioksidista. Toisin sanoen siis biokaasua. On arvioitu, että noin 70 % metaaninmuodostuksesta tapahtuu asetaatin, asetotrofisten metanogeenien, kautta. Asetotrofisilla metanogeenillä on hidas kasvuvauhti, kahdentumisaika 2–12 vuorokautta, mikä vaikuttaa muun muassa jatkuvasekoitteen biokaasureaktorin viipymääjän määrittämiseen. Viipymääjän ollessa liian lyhyt, hitaasti kasvavat metanogeenit huuhtoutuvat ulos. (Kymäläinen 2015, 62.)

5 Biokaasun tuotanto

5.1 Raaka-aineiden sopivuus ja saatavuus

Biokaasun tuotantoon soveltuvat erilaiset sivutuotteet ja jätteet niin maataloudesta, yhdyskunnasta kuin teollisuudestakin. Biokaasun tuotantoon parhaiten soveltuvat raaka-aineet ovat jalostusketjujen jätteistä ja sivutuotteista syntyvät biomassat. Hyviä biomassojen ominaisuuksia biokaasun tuotantoon ovat hiilihydraatit, proteiinit ja rasvat. Hapettomissa olosuhteissa ne hajoavat nopeasti tuottaen biokaasua. (Kymäläinen ja Luostarinen 2015, 21.)

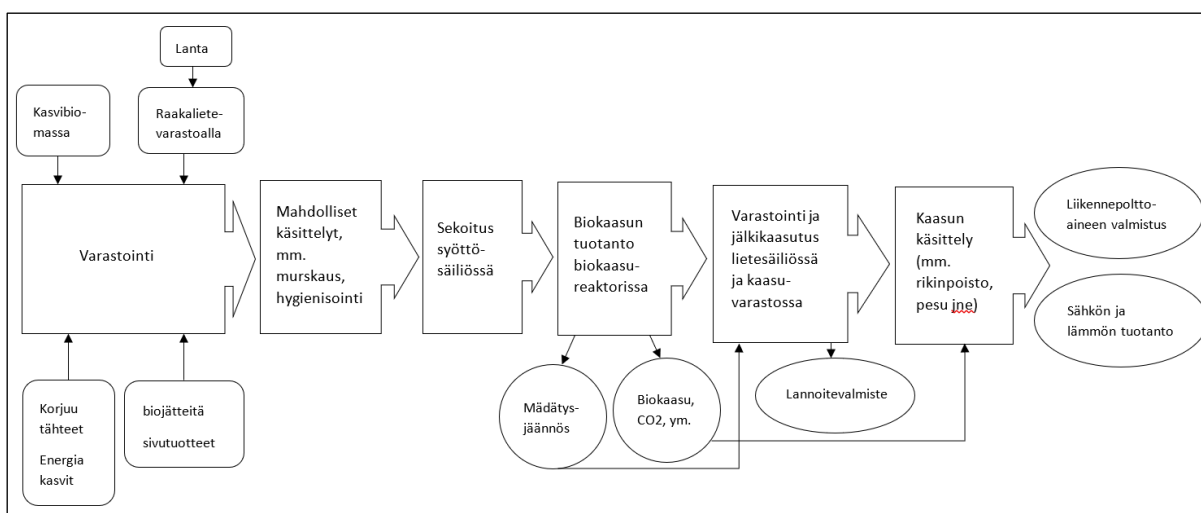
Raaka-aineiden soveltuvuutta biokaasun tuotantoon voidaan arvioida monin eri tavoin. Arvioitavia yhdisteitä ovat muun muassa helposti hajoavan orgaanisen aineen määrä, metaanintuottopotentiaali, kuiva-ainepitoisuus, hiili/typpi – suhde (C/N) ja / tai ravinne- ja hivenainekoostumus. Tärkeää on myös ottaa huomioon syötteessä mahdollisesti oleviin inhiboiiviin ja / tai toksisiin aineisiin. Inhibitiota aiheuttavia komponentteja, ja yleisemmin seurattavia, ovat ammoniakki, rikkivety ja rasvahapot, jotka muodostuvat hajoamisprosessissa. Esimerkiksi hyvin typpipitoinen syöte (sian- ja kananlanta, teurasjäte) ja sen hajoamisprosessissa syntyvä ammoniakki voi aiheuttaa inhibitiota varsinkin, jos typpipitoisuus nousee äkillisesti. Hyvin rasvapitoisia syötteitä ovat tyypillisesti elintarviketeollisuudesta tulevat jätteet ja muun muassa proteiinien hajoamisprosessissa syntyy rikkivetyä. Biokaasuprosessia inhiboivia yhdisteitä ovat lisäksi muun muassa tietyissä määrin erilaiset metallit ja suolat (kationit). Haitallisia aineita biokaasun tuotantoprosessissa ovat antibiootit, desinfiointiaineet, pestisidit sekä korkeat suolapitoisuudet. (Kymäläinen 2015, 22, 67.)

Biokaasulaitoksen raaka-ainevalintaan vaikuttavat niiden sopivuus ja saatavuus. Valintaan saattaa vaikuttaa myös lopputuotteen eli mädätysjäännöksen hyötykäytön laatuvaatimukset. Raaka-aineen soveltuvuutta biokaasun tuotantoon arvioidaan käytännössä testeillä ja laboratorioanalyysillä, joita ovat esimerkiksi pH, kuiva-aine, orgaaninen kuiva-aine, COD, kokonaistyyppi ja metaanintuottotesti. Raaka-aineen saatavuus on paikallista ja se on merkittävä asia biokaasulaitoksen kannattavuuden sekä häiriöttömän ja keskeytymättömän toiminnan kannalta. (Kymäläinen 2015, 22.)

Biokaasun tuotanto edellyttää sopivia reaktioliolosuhteita, mihin pystytään vaikuttamaan syötteen koostumuksen avulla. Biokaasun tuotannossa voidaan käyttää erilaisia raaka-aineita syöteseoksena. Seoksella saadaan aikaan optimaaliset olosuhteet, mikä ei välttämättä ole mahdollista vain yhdellä syötteellä. Tällaista käsittelyä kutsutaan yhteiskäsittelyksi ja biokaasulaitosta, joka käyttää tällaista menetelmää, kutsutaan yhteiskäsittelylaitokseksi. (Kymäläinen ja Luostarinen 2015, 21–22.)

5.2 Biokaasuprosessi

Biokaasua voidaan tuottaa joko märkä- tai kuivaprosessina. Märkäprosessissa kuiva-aineen pitoisuus on maksimissaan noin 15 %. Kuivaprosessissa syötesekoitus voi sisältää enintään noin 45 % kuiva-ainetta. Yleensä kuiva-ainepitoisuus on 30–40 % välillä. Biokaasun tuotantoprosessin (kuvio 1) mikrobit tarvitsevat näin ollen paljon vettä toimintaansa. Mikro-organismit tarvitsevat toimiakseen myös ravinteita. Pääravinteita ovat hiili, typpi, fosfori ja rikki. Muita välttämättömiä ravinteita ovat hivenaineet ja vitamiinit, jotka pitävät yllä mikro-organismien entsyymitoimintaa. Näiden prosessissa tarvittavien raaka-aineiden olisi hyvä tulla syötteestä itsestään, jolloin ei tarvittaisi lisäravinteita. Tämä onnistuu esimerkiksi yhteiskäsittelyllä, jonka avulla voidaan säätää syöteseos sopivaksi. (Kymäläinen 2015, 23, 26.)



Kuvio 2. Biokaasun tuotantoprosessi (Mukailtu: Paavola 2006, 68)

Biokaasuprosesseja on erilaisia: märkä- ja kuivaprosessit, jatkuvatoiminen prosessi, panosprosessi, yksivaiheinen prosessi sekä kaksivaiheinen prosessi. Biokaasuprosessi koostuu lisäksi erilaisista vaiheista (yksikköoperaatioista) sekä ennen että jälkeen biokaasureaktorin. (Luostarinen 2015, 82.)

Laitostekniikan valitsemisessa vaikuttaa raaka-ainepohja ja tekninen ratkaisu vaikuttaa taas siihen, millaisia rakenteita laitos vaatii. Biokaasulaitokset muodostuvat osaprosesseista, joihin on olemassa erilaisia tekniikoita. Tekniikoiden eroavaisuuksia ovat syöttötapa (panos tai jatkuva), kuiva-ainepitoisuus (märkä tai kuiva) ja vaiheisuus (yleensä yksi tai kaksi). Saatavien syötteiden ominaisuudet määrittelevätkin pitkälti biokaasulaitoksen tekniikan. Lisäksi on hyvä huomioida laitoksen energiatuottotavoitteet ja halutut mädätysjäännöksen ominaisuudet. (Luostarinen 2015, 82.)

5.2.1 Märkä- ja kuivaprosessi

Biokaasulaitokset toimivat joko märkä- tai kuivaprosesseina. Olennaisin ero näissä on syötemateriaalin kuiva-ainepitoisuus. Märkäprosessin pääraaka-aineena ovat lietemäiset syötemateriaalit (TS enintään 15 %) ja kuivaprosessin syötemateriaalit ovat kuivia (TS noin 20–40 %). (Luostarinen 2015, 82.)

Märkäprosessissa yleisesti käytettävä tekniikka on jatkuvatoiminen, täyssekoitteinen reaktori (CSTR, continuous stirred-tank reactor). Syötemateriaali on yleensä kuiva-ainepitoisuudeltaan (TS) 15 %, jolloin materiaali voidaan pumpata reaktorin sisään ja ulos. Alle 15 % kuiva-ainepitoisuus mahdollistaa myös reaktorissa biomassan tehokkaan mekaanisen sekoittamisen. Märkäprosessiin voidaan lisätä myös kuivia materiaaleja. Kuivien syöttömateriaalien lisäys prosessiin voidaan tehdä erillisellä syöttölaitteella tai kuiva-aines voidaan sekoittaa lietemäisen materiaalin joukkoon ennen syöttöä. Kuiva-ainepitoisuuden tulee kuitenkin pysyä alle 15 % reaktorin sisällä, jotta sekoitus ja materiaalin poisto on mahdollista. Kuivaa syötemateriaalia voidaan myös laimentaa jollakin saatavilla olevalla nesteellä märkäprosessin aikaansaamiseksi. Käytettävä neste voi olla esimerkiksi mädätysjäännöksestä erotettu nestejäte. Pienessä mittakaavassa tämä ei ole todennäköisesti kannattavaa, sillä investointikustannus ja työmäärä kasvaa, kun prosessi monimutkaistuu. Märkäprosesseja voidaan kuitenkin käyttää missä mittakaavassa tahansa (Luostarinen 2015, 82–83.)

Märkämädätysprosessi on kosteille biomassoille optimaalinen vaihtoehto biokaasun tuotantoon. Reaktorit tarvitset toimiakseen erittäin tasalaatuista syötettä ja tästä vesipitoisuuden täytyy olla yli 90 %. Yleisimpiä kosteita syötemateriaaleja ovat lietelannat ja jätevedenpuhdistamojen lietteet. (Biovoima 2021b.)

Kuivaprosessit voivat olla joko jatkuvatoimisia tai panostoimisia. Olennaisinta on prosessien operointi yleensä 20–40 % kuiva-ainepitoisuudessa. Kuivaprosesseilla on pienempi reaktorilavuus per tuoretonni syötemateriaalia, mitä pidetään prosessin etuna. Tekninen hallinta on kuitenkin haastavampaa kuin märkäprosesseilla, minkä vuoksi ne eivät ole yleisesti käytössä. Kuivan materiaalin sekoitusta pidetään erittäin haastavana ja siten myös kontaktin varmistamista prosessiolosuhteiden, mikrobien ja käsiteltävän massan välillä. Lisäksi massojen siirto, hihnoilla tai ruuveilla, ja biokaasun haihtumisen varmistaminen kuivasta massasta, on haasteellisempaa. (Luostarinen 2015, 83.)

Kuivamädätyksellä (tulppavirtaustekniikka), mahdollistetaan kuitenkin haastavienkin syötemateriaalien käsittely, koska prosessi ei ole yhtä herkkä epäpuhtauksille kuin märkäprosessi. Epäpuhtaudet voivat aiheuttaa kellumis- ja sedimentoitumishaasteita. Kuivaprosessiin soveltuvat jopa kuiva-ainepitoisuudeltaan 35 % syötteen ilman, että tarvitsee ulkoisesti

lisätä vettä. Prosessiin soveltuvat niin kuivahkot heinämaterialit kuin erilaiset biojätevirrat. Kuivaprosessilla saadaan myös suurempi kaasuntuotto per reaktorikuutio kuin märkäprosessilla. (Biovoima 2021b.)

5.2.2 Jatkuvat toimiset prosessit ja panosprosessi

Kuivaprosessit voivat olla sekä panos- että jatkuvatoimisia ja märkäprosessit ovat yleensä aina jatkuvatoimisia. Jatkuvatoimisessa prosessissa syötetään säännöllisesti materiaalia ja poisto tapahtuu tietyn väliajoin. Näin ollen biokaasun tuotanto on jatkuvaa ja mahdollisimman tasaista. Panosprosessissa reaktori täytetään, suljetaan ja materiaali jätetään hajoamaan halutuksi ajaksi, minkä jälkeen reaktori tyhjenetään. (Luostarinen 2015, 83.)

Jatkuvatoiminen märkäprosessi

Jatkuvatoimisessa märkäprosessissa käytettävä reaktori on yleensä muodoltaan lieriö (sylinderimäinen) (kuva 3) ja sen sisällön sekoitus tapahtuu mekaanisesti lapasekoittimilla tai muulla vastaavalla. Kaasusekoitusta voidaan myös käyttää. Tällöin laitoksessa syntyvän biokaasun hyödyntäminen tapahtuu puhaltamalla se pohjan venttiilien kautta, jolloin massa sekoittuu reaktorissa. Sekoituksen avulla pidetään reaktorissa oleva massa tasalaatuisena, varmistetaan sen lämpötilan pysyminen tasaisena, hyvät syötemateriaalin ja mikrobien väliset kontaktit sekä biokaasun vapauttaminen kaasutilaan, joka sijaitsee reaktorin yläosassa. Näin voidaan varmistua syötemateriaalien hallitusta hajoamisesta. (Luostarinen 2015, 83–84.)



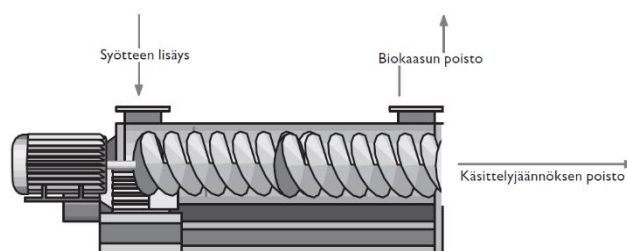
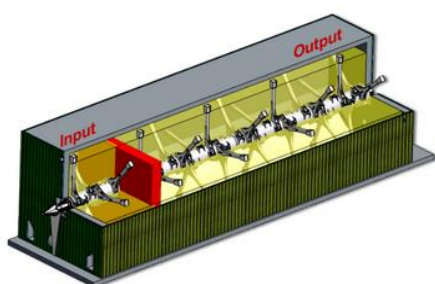
Kuva 1. Luonnonvarakeskuksen maatilakohtainen biokaasulaitos Maaningan toimipisteessä (Pyykkönen 2015, 85)

Jatkuvatoiminen kuivaprosessi

Jatkuvatoimisen kuivaprosessin tekniikka perustuu yleensä tulppavirtaukseen (kuvat 2 ja 3). Tällöin raaka-ainetta syötetään sylinterimäiseen reaktoriin toisesta päästä, sylinterin sisällä tapahtuu massan siirto ja toisesta päästä poistetaan muodostunut mädätysjäännös. Kuivaprosessin syötteeseen täytyy lisätä merkittävä määrä jo prosessin läpikäynyttä mädätysjäännöstä mikrobiympiksi ja / tai nesteettä, joka on suotautunut prosessista. Yksi vaihtoehto on myös lisätä mädätysjäännöksestä saatua nestejätettä, mikä kierrättää samalla hajomiseen tarvittavia mikrobeja. Tällä tavoin saadaan myös säädettyä prosessin kuiva-ainepitoisuutta. (Luostarinen 2015, 86.)



Kuva 2. Tulppavirtausreaktori, joka sijaitsee Thonissä Itävallassa (Paavola 2015, 86)



Kuva 3. Tulppavirtausreaktori vasemmalla (Ecoprotech 2021) ja vasemmalla tulppavirtausreaktorin toimintaperiaate (Latvala 2009, 32)

Nesteiden kierrätys on optimoitava reaktorissa, jotta välttyttäisiin liialliselta typpipitoisuuden nousulta ja siten typen inhibitiolta. Jatkuvatoimisia kuivaprosesseja käytetään lähinnä yhdyskuntien biojätteiden ja vastaavien materiaalien käsittelyssä suurissa laitoksissa. (Luostarinen 2015, 86.)

Panostoiminen kuivaprosessi

Yleensä panosreaktoreita (kuva 4) käytetään kuivaprosesseille. Panosreaktoria käytettäessä, se täytetään yhdellä kertaa ja materiaali jätetään hajoamaan tietyksi ajaksi ennen reaktorin tyhjentämistä. Panosprosessissakin tuoreen syötemateriaalin joukkoon sekoitetaan mädätysjäännöstä mikrobiympiksi. Prosessista suotautunutta nestettä voidaan myös kierrättää sumuttamalla sitä panosmassan päälle, jolloin mikrobitkin kiertävät. Samalla saadaan säädettyä kosteustasapainoa prosessissa, hajoamista ja kaasuntuottoa. Kaasuntuottoa saadaan tasattua useilla panosreaktoreilla sarjassa. Panoksia on siis koko ajan täydessä, tuottamassa kaasua ja tyhjennettävänä. (Luostarinen 2015, 87.)



Kuva 4. Panosreaktori kuivalle biomassalle. Muodostuva neste kerätään talteen (pyöreä allas) kierrättäen sitä prosessissa. (Salimäki 2015, 88.)

Panosprosessit eivät ole kasvattaneet suosiotaan, koska niitä on aikaisemmin pidetty tehottomina. Hajoamisprosessin hallinta on vaikeampaa kuin märkäprosessilla ja mädätysjäännös hajoaa joskus heikosti aiheuttaen epätasalaatuisuutta. Suositeltava jatkokäsittelymenetelmä on kompostointi, mikä tapahtuu pääsääntöisesti aumassa. Mädätysjäännöksen

sisältämästä typestä hukataan kuitenkin merkittävä osa aumakompostoinnilla ja samalla aiheutuu haitallisia ammoniakkipäästöjä. (Luostarinen 2015, 87–88.)

Panosprosessisovelluksena käytetään suotopetireaktoria, jossa nestettä käytetään kuivan syötemateriaalin huuhtelemiseen. Hajoamistuotteet liukenevat käytettävään nesteeseen. Nesteen kierrätys prosessissa voidaan tehdä sellaisenaan ja pyrkiä tuottamaan suoraan biokaasua tai neste voidaan johtaa erilliseen reaktoriin biokaasun muodostamiseksi. (Luostarinen 2015, 88.)

5.2.3 Yksi- ja kaksivaiheinen prosessi

Yksivaiheisessa prosessissa on, nimensä mukaisesti, yksi biokaasureaktori, jossa tapahtuu suurin osa biokaasun tuoton vaiheista. Kaksivaiheinen prosessi sisältää yleensä erilliset hydrolyysivaiheen ja metaanintuottovaiheen reaktorit. Tämän tavoitteena on optimoida hajoamista niin, että hydrolyysin ja asidogeneesin haihtuvien rasvahappojen muodostuminen tapahtuu omassa reaktorissa ja metanogeneesin optimointi tapahtuu erikseen. (Luostarinen 2015, 89.)

Yksivaiheinen prosessi on helpompi hallita kuin kaksivaiheinen prosessi ja se on kustannuksiltaan edullisempi. Kaksivaiheinen prosessi tarkoittaa prosessitekniikan kannalta kahta sarjassa olevaa reaktoria, joiden operointi tapahtuu hieman eri tavalla. Prosessi sisältää näin ollen enemmän automatiikkaa ja massojen siirtoja. Lisäksi operoinnin- ja prosessi-osaamisen tulee olla tarkempaa, jotta onnistuminen voidaan taata. Suotopetireaktori on yksi esimerkki kaksivaiheisesta prosessista. (Luostarinen 2015, 89.)

Prosessitekniikoiden vertailu

Taulukossa 1 on vertailtu kuiva- ja märkäprosessitekniikoita.

Kriteerit	Kuivaprosessi (jatkuvatoiminen)	Kuivaprosessi (panosprosessi)	Märkäprosessi
Raaka-aineen vaatimukset	Kuiva-ainepitoisuus (TS) 20 - 40 %	Kuiva-aine pitoisuus (TS) max. 50 %	Kuiva-ainepitoisuus (TS) max. 13 %
Syötteen käsittely	Homogenisointi	Esisekoitus, tihkutus- ja kierto-tekniikka	Homogenisointi
Tyypilliset häiriöt	Murskaimen tukkeutuminen	Sprinklerin suiden sekä siivilöiden ja seulojen tukkeutuminen	Vaahoaminen, uppoava kerros, kelluva kerros
Laitos	Jatkuvatoiminen, voidaan laajentaa lisäämällä moduleja	Moduleista koostuva, panostoiminen	Yksi- tai monivaiheinen, jatkuvatoiminen
Käyttöhäiriön vaikutus	Ei suurta vaikutusta kokonaisuuteen	Vaikuttaa vain yhteen panokseen	Vaikuttaa koko prosessiin
Prosessiin vaadittu energia	Enemmän	Vähemmän (pumppu vain tihkutusvedelle)	Enemmän (homogenisointitarve)
Päästöt	Vähemmän	Vähemmän	Enemmän
Tyypilliset syötteen	Kiinteä biojäte, kuiva-lanta, energiakasvit	Kuivalanta, kiinteä biojäte, energiakasvit	Lietelanta, teollisuus- ja yhdyskuntalietteet
Hygieenisuus	Ei ongelmallinen	Ei ongelmallinen	Ongelmallisempi

Taulukko 1. Prosessitekniikoiden vertailua (Latvala 2009, 33)

5.3 Biomassojen yhteiskäsittely sekä yhteiskäsittelylaitos

Syötemateriaalien yhteiskäsittely

Erilaisia materiaaleja voidaan sekoittaa keskenään ja näin tasapainottaa käsiteltävien materiaalien ravinne- ja kosteuspitoisuuksia. Orgaanisen materiaalin hajoaminen parantuu ja metaanin tuotanto lisääntyy. Lantojen ja kiinteiden aineiden yhteiskäsittelyllä saadaan kiinteistäkin aineista muodostettua lietemäisiä ja helpommin pumpattavia. Kiinteämmästä aineesta saadaan helpommin käsiteltävää niin prosessissa kuin sen jälkeen. Yhteiskäsittelyllä voidaan vähentää myös inhiboivien aineiden pitoisuuksia haitattomampaan muotoon. Yhteiskäsittelyä voidaan käyttää sekä kuiva- että märkäprosessissa. (Lehtomäki, Paavola, Luostarinen ja Rintala 2007, 30,32–33.)

Yhteiskäsittelyssä metaanin tuotanto lisääntyy kasvimassan sisältämän runsaan hiilen vuoksi, jolloin ammoniakkin aiheuttama inhibitio vähenee ja hiili (C) / typpi (N) -suhde mädätysprosessissa nousee. Jos C/N-suhde on jo valmiiksi korkea, silloin hiilen lisäys vähentää metaanintuottoa, koska tuestä muodostuu rajoittava ravinne. Yhteiskäsittelyssä on huomattu metaanintuoton laskevan, kun syötteessä kasvien osuus on noussut liian suureksi. Lannan ja käytetyn kasvimateriaalin sopiva sekoitussuhde onkin tärkeää arvioida sekä materiaalien laatu ja määrä, jotta saadaan paras metaanintuotto. (Lehtomäki ja muut 2007, 30.)

Kuiva- ja märkämädätyksen yhdistelmälaitos

Yhdistelmälaitoksessa yhdistyy kuiva- ja märkämädätystekniikat sekä niiden tärkeimmät edut. Kuivaprosessilla on korkeampi kuormitettavuus kuin märkämädätyksellä, joten se mahdollistaa laitoksen korkean käytettävyyden sekä kaasun tuotannon reaktorikuutiota kohti. Märkäprosessi puolestaan mahdollistaa syötteen pitkän viipymääjan, jolloin orgaanista materiaalia hajoaa enemmän biokaasuksi kuin mitä muilla tekniikoilla luultavasti saataisiin aikaan. (Biovoima 2021a.)

Yhdistelmälaitoksella on monia etuja. Se on varmatoiminen, jolloin voidaan hyödyntää vaikeillekin syötteille soveltuvaa tulppavirtausreaktoria. Tämä on laitoksen ensimmäisenä vaiheena. Yhdistelmälaitos takaa pitkän viipymääjan, joka optimoi orgaanisen materiaalin hajoamista ja jälkimädätysreaktorilla saadaan paras biokaasun tuotto. Käsittelykapasiteetin lisääminen onnistuu myös helposti rinnakkaisilla reaktoreilla (modulaarinen laitosrakenne). Yhdistelmälaitoksella vähennetään myös ulkoisen veden tarvetta, jopa poistaa kokonaan, koska nestemäistä käsittelyjäännöstä voidaan kierrättää prosessin sisällä. (Biovoima 2021a.)

5.4 Mädätysjäännös

Mädätysjäännöstä muodostuu aina biokaasuprosessin eli mädätyksen lopputuotteena ja sitä muodostuu suunnilleen sama verran kuin on syötemäärä. Kokonaisuudessa ei siis käytännössä juurikaan vähene, vaikka kuiva-aineesta muodostuu biokaasua. Lisäksi ravinteet säilyvät mädätysjäännöksessä, mikä mahdollistaa laadukkaiden lannoitevalmisteiden ja kierrätysravintetuotteiden valmistuksen. Näitä hyödynnetään yleensä kasvintuotannossa ja joitakin teollisuussovelluksia on jo olemassa. (Paavola 2015, 94.)

Mädätysjäännöksen raaka-ainekoostumus on sama kuin mitä on biokaasulaitokseen syötetty. Mädätysjäännöksessä on jäljellä kaikki pää- ja hivenravinteet, jotka syötteen raaka-aineet sisältävät. Näitä ovat esimerkiksi typpi, fosfori, kalium ja magnesium. Ravinteiden kokonaispitoisuus pysyy siis samana koko prosessin ajan. (Paavola 2015, 94.)

Erilaiset biokaasuprosessin olosuhteet vaikuttavat mädätysjäännöksen ominaisuuksiin, kuten lämpötila, orgaaninen kuormitus, viipymä ja käytetty teknologia; esimerkiksi kuiva- tai märkäprosessi, tulppavirtaus vai täyssekotteinen ja niin edelleen (Paavola ja Kapuinen 2015, 94). Esimerkiksi jatkuvatoimisesta kuivaprosessista saatavaa mädätysjäännöstä ei välttämättä voida hyödyntää sellaisenaan lannoitekäyttöön, jos markkinoilla olevat levityslaitteet eivät pysty sitä käyttämään. Jäännös saattaa olla tahmeaa tai sekoitusvaikeuksista johtuen epätasalaatuista. (Luostarinen 2015, 86.) On tärkeää tuntea raaka-aineiden ominaisuudet, kuten ravinnepitoisuus, biologinen hajoaminen ja mahdolliset haitta-aineet, jotta voidaan arvioida ja ymmärtää mädätysjäännöksen ominaisuuksia, jatkoprosessointia ja mahdollisia käyttökohteita (Paavola 2015, 94).

Mädätysjäännöksessä kuiva-aineen ja orgaanisen aineen pitoisuus on alhaisempi kuin laitokseen syötetyn materiaalin. Tämä johtuu siitä, että osa aineksesta hajoaa biokaasuprosessissa biokaasuksi. Näin ollen mädätysjäännös on juoksevampaa ja tasalaatuisempaa kuin syötteenä käytetty materiaali. Edellä mainitut ominaisuudet parantavat mädätysjäännöksen hyödynnettävyyttä esimerkiksi kasvinravinnekäytössä. Biokaasuprosessi toimii myös materiaalien hygienisointina eli taudinaiheuttajia ja rikkakasvien siemeniä tuhoutuu. (Paavola 2015, 94–95.)

Biokaasuprosessissa tapahtuva typen mineralisaatio (ammonifikaatio eli typen liukoistuminen) parantaa mädätysjäännöksen arvoa kasvinravinnekäytössä verrattuna syötemateriaaliin. Mitään yksiselitteistä arvoa ei ole olemassa, koska esimerkiksi naudon ja sian lannalla on erilainen mineralisoituminen ja kasvibiomassalla jopa 50–80 %. Lisäksi typen haihtumisriski lisääntyy, kun pH nousee biokaasuprosessin myötä. Mädätysjäännöksen käsittelyssä, jatkoprosessoinnissa, varastoinnissa ja hyödyntämisessä pitää olla tarkkana, jotta ei

menetetä prosessin hyötyjä. Mädätysjäännöksestä saatujen lopputuotteiden koostumus voi olla nestemäistä tai kiinteää ja ne soveltuvat monipuolisesti hyötykäyttöön (taulukko 2). (Paavola 2015, 95.)

Raaka-aineet	Olomuoto	Kauppanimi	TS (%)	N (g kg ⁻¹)	P (g kg ⁻¹)	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	Erityisesti 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

Taulukko 2. Esimerkkejä lannoitevalmisteista, joita markkinoilta löytyy (TS=kuiva-aine, N=kokonaistyppi, P=kokonaisfosfori) (Paavola 2015, 113)

6 Biokaasun puhdistus ja jalostus biometaaniksi

6.1 Yleistä biokaasun puhdistuksesta ja jalostuksesta

Biokaasu puhdistetaan ja jalostetaan raakabiokaasun tuotannon jälkeen. Puhdistusprosessissa kaasu kuivataan ja siitä poistetaan epäpuhtauksia, kuten rikkivetyä ja siloksaaneja. Liikennekäyttöön soveltuvaksi biokaasu jalostetaan biometaaniksi, mikä tapahtuu poistamalla hiilidioksidi. Liikennekäyttöä varten biometaani täytyy paineistaa, jolloin puhutaan paineistetusta biokaasusta (CBG = compressed biogas). (Suomen kaasuyhdistys 2021.)

Biokaasun puhdistus ei tarkoita täydellistä puhdistusta, jolloin saataisiin sataprosenttista metaania, eikä se ole tarpeen energiantuotannon laitteita varten. Biokaasu puhdistetaan, jotta ehkäistäisiin energiantuotantolaitteiden ja jalostuslaitosten vaurioituminen. Biokaasun jalostuksessa puolestaan kaasusta poistetaan / vähennetään inerttejä kaasuja, kuten hiilidioksidi ja typpi, sekä nostetaan energiatiheyttä. (Lampinen 2015, 126.)

Puhdistettua biokaasua käytetään lämmitykseen sekä sähkön tuotantoon ja jalostettua biokaasua yleisesti liikenteessä. Jalostettua kaasua on myös helpompi kuljettaa verkoissa ja ajoneuvoissa. Biokaasun pääkäyttömuotojen resurssitehokkuus on esitetty taulukossa 3. (Lampinen 2015, 126–127.)

Käyttö	Kokonaishyötysuhde loppukäyttöön toimitetulle energialle	Energiatehokkuus	Exergiatehokkuus	Jalostusarvo
Lämpö	70–95 %	Korkea	Nolla	Alhainen
Sähkö	20–40 %	Keskinkertainen	Korkea	Keskinkertainen
Liikenne	80–95 %	Korkea	Korkea	Korkea

Taulukko 3. Biokaasun käyttömuotojen resurssitehokkuus (Lampinen 2015, 127)

Raakabiokaasun koostumus on vaihtelevaa ja siksi se on tärkeää selvittää aina tapauskohtaisesti ennen kuin valitaan puhdistus- ja jalostusteknologioita sekä menetelmiä sivutuotteiden erottamiseen (Lampinen 2015, 127). Biokaasun laatu voi vaihdella paljonkin eri laitosten välillä, mutta pääkomponentit ovat metaani ja hiilidioksidi (Suomen kaasuyhdistys 2021).

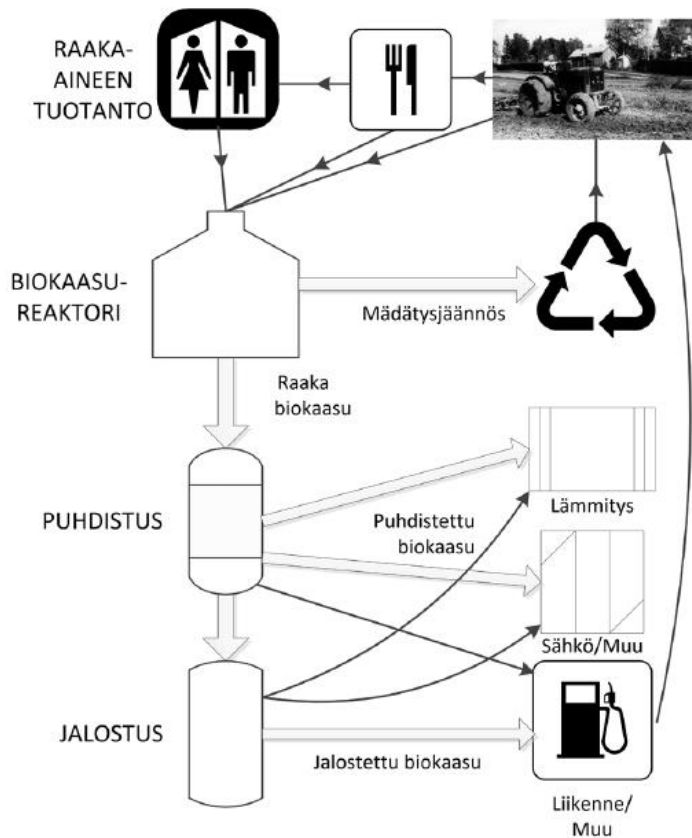
Raakabiokaasussa energiakaasuja ovat metaani sekä vety ja inerttejä komponentteja hiilidioksidi ja typpikaasu, jotka eivät kuitenkaan haittaa kaasun käyttöä energiana. Muut biokaasun komponentit ovat epäpuhtauksia. Nämä halutaan poistaa kaasuseoksesta laitteisto-

ja päästöhaittojen vuoksi. Näitä, kuten myös typpikaasua ja hiilidioksidia, voidaan käyttää sivutuotteiden valmistukseen. Biokaasun eri komponentit nähdään taulukosta 4. (Lampinen 2015, 127.)

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

Taulukko 4. Raakabiokaasun ja jalostetun biokaasun ominaisuudet (Lampinen 2015, 128)

Puhdistettua biokaasua voidaan polttaa esimerkiksi kattiloissa energiantuotantoon ja jalostettua biokaasua eli biometaania voidaan hyödyntää laajemminkin. Kuvassa 5 nähdään yksinkertaistetusti biokaasun käsittely ja käyttö. (Suomen kaasuyhdistys 2021.)



Kuva 5. Biokaasun käsittely ja käyttökohteet (Lampinen 2015, 125)

6.2 Puhdistusprosessi

Biokaasun käyttö lämmitykseen ja sähkön tuotantoon sekä liikennepolttoaineeksi edellyttää normaalitoiminnassa puhdistusta, jossa biokaasusta poistetaan epäpuhtauksia (taulukko 5). Inertit kaasut, kuten typpi ja hiilidioksidi, poistetaan vasta mahdollisessa jalostusprosessissa, koska ne eivät ole epäpuhtauksia. Toisin sanoen niistä ei koidu ongelmia energiantuotantolaitteisiin eivätkä ne tuota haittapäästöjä. (Lampinen 2015, 131.)

Puhdistuksessa poistetaan aina vähintään vesihöyry ja rikkivety. Näitä yhdisteitä on aina raakakaasussa ja yhdessä ne muodostavat rikkihappoa. Muut epäpuhtaudet (taulukko 5) poistetaan tarvittaessa ja tyypillisesti alle 1 %:iin kuivan raakakaasun tilavuudesta. Yksinkertaisimmillaan puhdistusjärjestelmään kuuluu silikageeliadsorptioyksikkö, kuivaus ja biologinen rikkivedyn pelkistäminen biokaasureaktorissa. (Lampinen 2015, 131.)

Puhdistusprosessin suunnittelu perustuu raakakaasun koostumukseen sekä laitevalmistajien laatuvaatimukseen (taulukko 6) ja se tulee suunnitella aina tapauskohtaisesti. Puhdistusprosessi hajautetaan usein eri osiin tuotanto- ja käsittelyketjua, mutta erillisillä yksiköillä toteutetaan aina vesihöyryn ja usein myös rikkivedyn puhdistus. Osa puhdistusprosessista on myös integroituina muihin järjestelmiin ja, jos jalostamo kuuluu käsittelyjärjestelmään,

on se myös osa puhdistusjärjestelmää, koska kaikilla jalostusteknologioidella on vaikutusta epäpuhtauksiin. Jalostamoiden vaatimukset vaikuttavat myös sisään tulevan kaasun puhdistustarpeeseen. (Lampinen 2015, 132.)

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

Taulukko 5. Biokaasussa olevat epäpuhtaudet, niiden aiheuttamat haitat sekä puhdistusmenetelmät (Lampinen 2015, 131)

Voimanlähde/tyyppi	Otto- ja dieselmoottori/ICE	Kaasuturbiini/ICT	Mikroturbiini/ICT	Polttokenno (SOFC)/FC	Stirlingmoottori/ECE*)
Rikki [ppm CH ₄]	545–1742	< 10 000	25–70 000	< 1	280
Pii [ppm CH ₄]	9–44	0,087	< 0,01	< 0,01	0,42
Halogeenit [ppm CH ₄]	60–491	1 500	200	< 5	232

Taulukko 6. Sähkö- ja liikenne-energian tuotannon voimanlähteille asetettuja laatuvaatimuksia erältä laitevalmistajilta (Lampinen 2015, 133)

*) Koska stirling-moottori on ECE-moottori (external combustion engine), sen polttoprosessi on tarvittaessa suunniteltavissa hyvinkin suurille epäpuhtauspitoisuuksille.

Puhdistus on monimutkaisempaa ja laajempaa kuin kaasun jalostus (Lampinen 2015, 132). Sen läpikäynti on oma aiheensa, joten sen syvemmin tässä opinnäytetyössä ei asiaan syvennytä. Liikennekäytössä biokaasun jalostuksella on suurempi merkitys kaasun peruspuhdistuksen jälkeen, ja miksi tässä työssä keskitytään enemmän biokaasun jalostustekniikoihin.

6.3 Jalostustekniikat

Biokaasun jalostuksessa kasvatetaan kaasun energiasisältöä vähentämällä inerttien kaasujen määrää. Jalostus voidaan toteuttaa erillisillä jalostuslaitoksilla, mutta jalostus voidaan myös integroida muuhun tuotantoprosessiin. (Lampinen 2015, 134.)

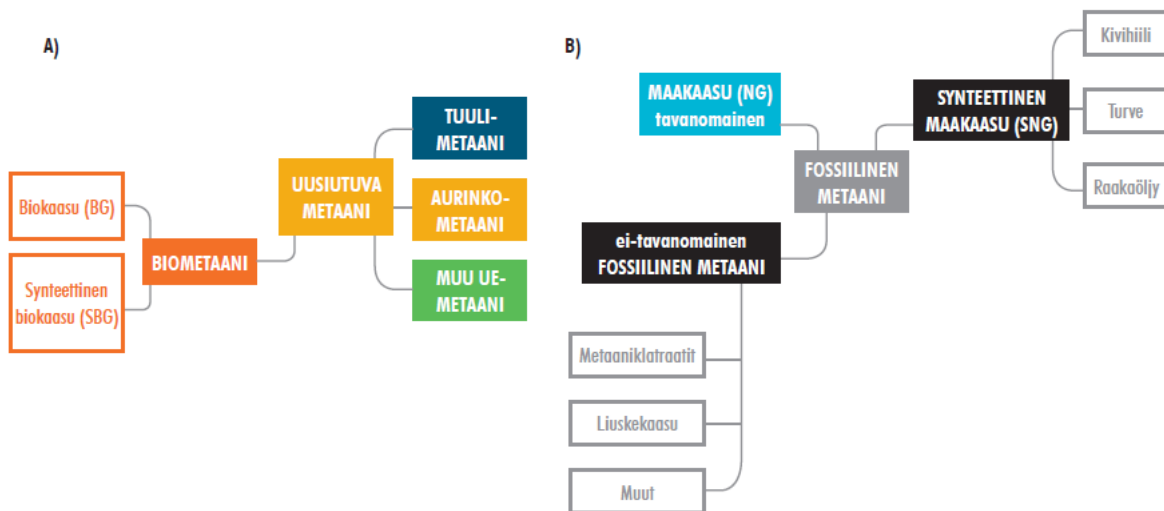
Jalostuksen kohteena on aina hiilidioksidi ja joskus myös typpikaasu. Argonia (Ar) on biokaasussa vain pieniä määriä, mutta mikäli typen poistoon käytetään kryojalostusta, vaikuttaa se myös argoniin. Inerttejä kaasuja ei energiakäytön takia poisteta kokonaan, koska nämä epäpuhtaudet eivät ole haitaksi moottoreiden toiminnalle. Hiilidioksidilla on lisäksi kaasun moottoritekniistä laatua parantavia ominaisuuksia, koska se lisää oktaanilukua. Kuten aiemmin on mainittu, jalostuksen tarkoituksena ei ole puhdistaa kaasua epäpuhtauksista, mutta esimerkiksi vesipesu toimii samanaikaisesti erittäin tehokkaana rikkivedyn puhdistuksena. Taulukossa 7 on vertailtu biokaasun ja maakaasun koostumusta jalostuksen (CO_2 ja N_2) ja puhdistuksen (H_2S) kannalta tärkeimpien yhdisteiden suhteen. Laadullisesti raaka biokaasu on parempaa kuin raaka kaatopaikkakaasu, joten jalostuksen ja puhdistuksen vaatimukset ovat pienemmät. (Lampinen 2015, 134.)

	Raaka biokaasu	Raaka kaatopaikkakaasu	Raaka maakaasu	Jalostettu bio- ja maakaasu
Metaani (CH_4)	45–75 %	20–55 %	44–98 %	> 84 %
Hiilidioksidi (CO_2)	20–55 %	25–50 %	0–54 %	< 16 %
Typpi (N_2)	0–5 %	10–25 %	0,2–26 %	< 16 %
Rikkivety (H_2S)	< 0,8 %	< 3 %	0–36 %	< 0,003 %

Taulukko 7. Vertailu biokaasun ja maakaasun koostumuksista (% = tilavuusprosenttia) (Lampinen 2015, 135)

Jalostetun biokaasun metaanipitoisuus tulee olla vähintään 95 %, kun biometaania käytetään ajoneuvoissa (Työterveyslaitos 2016). Vaatimukset voivat olla paljon pienemmät, kun biokaasu jalostetaan muuta käyttötarkoitusta varten. Esimerkiksi kaatopaikkakaasun metaanipitoisuuden ollessa alle 20 % se täytyy jalostaa sähkön tuotantoa varten, mikä on vähimmäisvaatimus parhaille kaatopaikkakaasumoottoreille, joita ovat stirling -moottorit. Lisäksi esimerkiksi otto -moottoreiden vähimmäisvaatimus metaanipitoisuudelle on yleensä 40 %, mutta parhaimpien on todettu toimivan jo 30 % metaanipitoisuudessa. (Lampinen 2015, 135.)

Kun valitaan jalostusteknologioita, metaanivuotojen alhaisuus on tärkein valintaperuste ympäristönsuojelulliselta kannalta, sillä metaani on 20–70 kertaa voimakkaampi kasvihuonekaasu kuin hiilidioksidi (CO₂). Jos metaanivuoto ylittää 10 %, on tuotetun biokaasun elinkaarenaikaiset kasvihuonepäästöt korkeammat kuin bensiinin ja dieselin päästöt. Fossiililla metaanilajeilla on hyvin vaihtelevat elinkaaripäästöt, mikä tarkoittaa, että verrattaessa biokaasua fossiilisista metaanilajeista parhaimpiin, jo 6 % vuoto voi aiheuttaa korkeammat elinkaaripäästöt, mutta huonoimpiin verrattuna jopa yli 90 % metaanihävikillä biokaasun elinkaaren aikaiset päästöt eivät ole korkeampia. Uusiutuvan ja fossiilisen metaanin lajit on esitetty kuviossa 3. (Lampinen 2015, 136.)



Kuvio 3. Uusiutuvan (A) ja fossiilisen (B) metaanin lajit (Lampinen 2015, 124)

Metaanivuoto ei tarkoita samaa asiaa kuin metaanihävikki, joka tarkoittaa jalostusyksikön läpi pääsevää metaania. Merkittävä osa metaanista voi päästä jalostusyksiköiden läpi, lukuun ottamatta amiinipesua ja kryojalostusta. Metaania kuitenkin hyödynnetään prosessissa uudelleen kierrättämällä se jalostusyksikköön tai jalostusyksiköitä kytketään useita peräkkäin. Tarvittaessa metaania voidaan hävittää jälkikäsittelyssä. Taulukossa 8 on vertailtu kaupallisia jalostusteknologioita. (Lampinen 2015, 136.)

	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 ³) ⁻¹] (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 ³) ⁻¹]			0,13			
Lämpötilavaatimus [°C]	1–20	55–80	120–160		< -80	
CH ₄ -pitoisuus, jos ei N ₂ (tyypillinen sulkeissa)	> 97 % (98 %)	> 96 % (98 %)	> 99 % (99,8 %)	> 96 % (98 %)	> 99 % (100 %)	> 96 % (98 %)
CH ₄ -pitoisuus, jos 20 % N ₂ (tyypillinen sulkeissa)	78 %	78 %	80 %	< 94 %	99 %	< 94 %
Esipuhdistus-tarve	Ei	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä
N ₂ :n erotusmahdollisuus	Ei	Ei	Ei	Kyllä	Kyllä	Kyllä
Kapasiteetti [Nm ³ h ⁻¹]	> 5	> 100	> 100	> 5	> 100	> 5

Taulukko 8. Vertailu kaupallisista jalostusteknologioista (Lampinen 2015, 137)

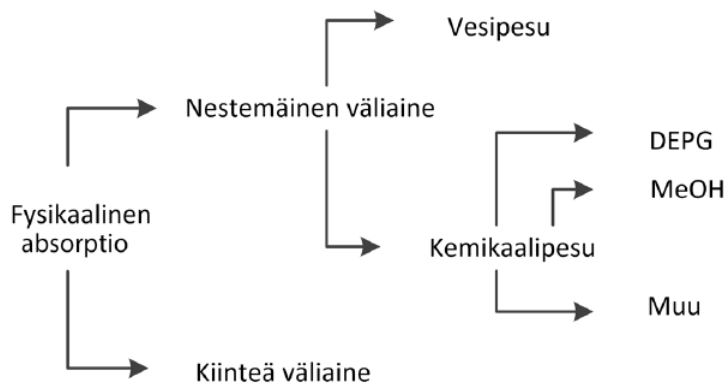
Lähtökohtaisesti pieni metaanihävikki tarkoittaa ympäristön kannalta parempaa. Varhaisimissa kalvo-, adsorptio- ja vesipesujalostamoissa havaittiin korkeita metaanihävikkejä ja -vuotoja. Moderneissa laitoksissa enää harvoin näitä on, mutta hävikkien ja vuotojen riski on sisällytetty edellä olevaan taulukkoon, koska aikaisemmin mainitut jalostamot ovat suosittuja uusien jalostamovalmistajien kesken. Tämä liittyy siihen, että ne mahdollistavat pienien jalostamoiden rakentamisen. (Lampinen 2015, 137.)

Tavanomaisissa reaktoreissa paras jalostusteknologia ympäristönäkökulmasta on amiinipesu, mutta vain, jos kaasu ei sisällä paljon typpeä. Korkeaa typpipitoisuutta esiintyy vain raa'assa kaatopaikkakaasussa. Amiinipesun etuja ovat myös alhainen sähkön tarve ja yhdessä kryojalostuksen kanssa saadaan laadullisesti korkeatasoisempaa lopputuotetta. Amiinipesu ja kryojalostus eivät sovellu hyvin pienen kokoluokan jalostamoille, joten niissä käytetään yleisesti vesipesua, aktiivihiiliadsorptiota ja kalvojalostusta. Kemikaalipesua käytetään nykyään harvoin. (Lampinen 2015, 137–138.)

Ensimmäisiä jalostustekniikoita olivat kryojalostus ja vesipesu. Kryojalostusta on käytetty 1920-luvusta saakka synteettisen maakaasun jalostukseen ja vesipesu (fysikaalinen absorptio) otettiin käyttöön 1930-luvulla, jota käytettiin silloin jo olemassa olevan biokaasun jalostukseen. Muita jalostusteknologioita ovat kemiallinen absorptio, fysikaalinen adsorptio ja kalvojalostus. (Lampinen 2015, 135–136.)

Fysikaalinen absorptio

Fysikaalinen absorptio perustuu hiilidioksidin liukoisuuteen. Tekniikoita ovat vesipesu ja kemikaalipesu. Fysikaalisessa absorptiossa kaasu sitoutuu nestemäiseen tai kiinteään väliaineeseen eli se liukenee. Kuviossa 4 nähdään fysikaalisen absorption vaiheet. Vesipesu on ollut käytössä 1930-luvulta ja kemikaalipesu 1980-luvulta alkaen. (Lampinen 2015, 136,139.)



Kuvio 4. Fysikaalisen absorption vaiheet (MeOH = metanoli, DEPG = Dimethyl Ether of Polyethylene Glycol) (Lampinen 2015, 139)

Vesipesu

Vesipesua käytettiin ensimmäisenä biokaasun jalostusmenetelmänä ja edelleen yksi tärkeimpiä menetelmiä jalostuksessa. Vesipesun menestymiseen on vaikuttanut muun muassa sen yksinkertaisuus, soveltuvuus kaikenkokoisiin laitoksiin ja se on kohtalaisen edullinen. Lisäksi vesipesussa ei tarvitse käyttää kemikaaleja, se toimii monien yhdisteiden puhdistusmenetelmänä (etenkin rikkivety) ja metaanilla sekä hiilidioksidilla on suurempi liukoisuus kuin useimmilla niillä nesteillä, joita käytetään kemikaalipesussa. Vesipesu perustuu hiilidioksidin ja metaanin liukoisuuseroihin, missä hiilidioksidilla on suurempi vesiliukoisuus. Kaasun liukoisuus veteen määritetään Henryn lain mukaan seuraavasti:

$$c_a = k_H \cdot p_g, \text{ missä} \quad (1.0)$$

c_a = konsentraatio vedessä [mol litra⁻¹]

k_H = Henryn lain vakio [mol litra⁻¹ · atm⁻¹]

p_g = kaasun osapaine [atm] (Lampinen 2015, 140.)

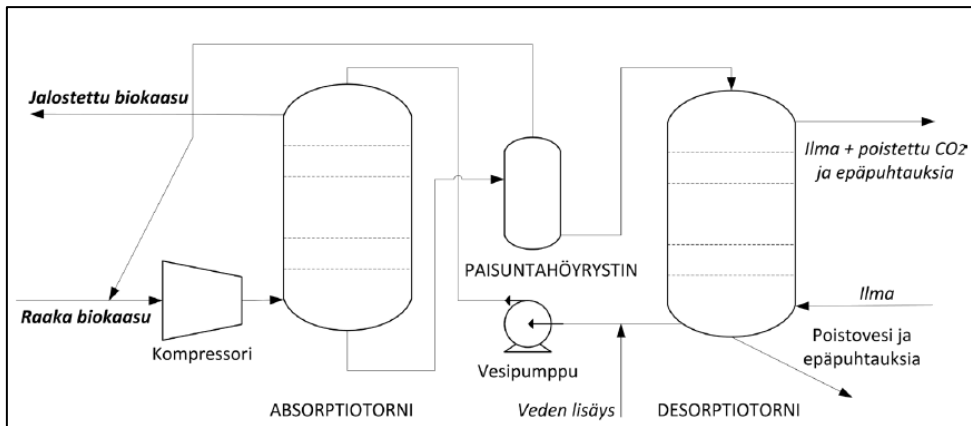
Henryn lain vakio on riippuvainen lämpötilasta, paineesta ja kaasusta. Mitä suurempi vakio on, sitä paremmin se liukenee veteen. Taulukossa 9 on joillekin kaasuille Henryn lain vakiota vedessä, kun lämpötila on 25 °C ja ilmakehän paine on 1. Kun lämpötila kasvaa, liukoisuus useissa tapauksissa alenee. Paineen nostaminen puolestaan lisää liukoisuutta. (Lampinen 2015, 140.)

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

Taulukko 9. Henryn lain vakio k_H (mol (litra atm)⁻¹) joillekin kaasuille 25 °C lämpöisessä vedessä ja 1 ilmakehän paineessa (Lampinen 2015, 141)

Metaaniin verrattuna hiilidioksidilla on 25 kertaa parempi liukoisuus. Vesipesulla voidaan näin ollen nostaa metaanipitoisuutta. Liukoisuusero ei kuitenkaan ole kovin suuri, joten myös metaania liukenee. Laitteiston tulee olla sellainen, ettei metaanihävikki nouse liian suureksi, mikä rajoittaa metaanipitoisuuden ylärajaa. (Lampinen 2015, 141.)

Vesipesu poistaa ammoniakki- ja rikkiyhdiste-epäpuhtaudet, joilla on suurempi vesiliukoisuus kuin hiilidioksidilla. Joitakin siloksaaneja voidaan poistaa vesipesun avulla, mutta ei kaikkia, sillä niillä on erittäin suuria liukoisuuseroja. Vesipesu (kuvio 5) poistaa monia epäpuhtauksia, joten poistuva kaasu ei sellaisenaan sovellu hiilidioksidin uudelleen hyödyntämiseen, koska jatkokäytön kannalta kaasu on liikaista. Hiilidioksidin hyödyntämiseen sivutuotteena tarvitsee valita vaihtoehtoinen menetelmä vesipesulle. Tehokkaan rikin puhdistuksen tuloksena voidaan sivutuotteena valmistaa alkuainerikkiä. (Lampinen 2015, 141.)



Kuvio 5. Vesipesujalostamon toimintaperiaate. (Lampinen 2015, 143)

Kemikaalipesu

Kemikaalipesu toteutuu käytännössä samalla tavalla kuin vesipesu, mutta absorboivana nesteenä ei käytetä vettä. Nesteen valinta tapahtuu siten, että hiilidioksidi liukenee siihen paremmin kuin veteen. Hiilidioksidin ja metaanin välillä olisi toivottava olla Henryn lain vakion ero suurempaa kuin vedellä, mutta käytännössä lähes kaikilla nesteillä tämä suhde on huomionompi kuin vedellä. Siksi käytetään paisuntahöyrystintä kuten vesipesussakin. (Lampinen 2015, 143.)

Kemikaalipesujalostamot ovat hankintahinnaltaan halvempia ja sähkön kulutus on alhaisempi kuin vesipesujalostamoilla, koska kemikaalipesulaitteisto on paremman hiilidioksidiliukoisuuden takia pienempi kuin vesipesulaitteisto. Erityisesti absorptio- ja desorptiotornit ovat paljon pienemmät. Teknologia ei kuitenkaan sovellu pieniin laitoksiin, koska pesukemikaali pitää lämmittää ennen desorptiota ja viilentää ennen absorptiota. Vaikka kemikaali- ja vesipesujalostamot näyttävät ulkoisesti samanlaisilta, on kemikaalipesujalostamoilla suurempi jalostuskapasiteetti kuin samankokoisella vesipesujalostamolla. (Lampinen 2015, 143.)

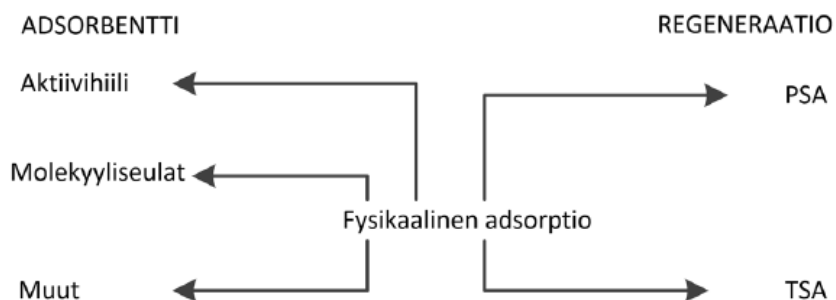
Kemiallinen absorptio

Kemiallinen absorptio perustuu hiilidioksidin kemiallisiin reaktioihin. Teknologia on ollut käytössä 2000-luvulta alkaen. Kemiallisessa absorptiossa hiilidioksidia vähennetään kemiallisilla reaktioilla, jotka voidaan tehdä joko kaasui- tai nestefaasissa. Kaikki markkinoilla olevat jalostuslaitokset, jotka perustuvat kemialliseen absorptioon toimivat nestefaasissa. Näissä laitoksissa absorptio toteutetaan fysikaalisesti kuten kemikaalipesussa, mutta pääprosessi on hiilidioksidia kuluttavat kemialliset reaktiot. Absorptionesteinä käytetään amiineja, minkä takia prosessia kutsutaan usein amiinipesuksi. Absorptioneste on yhden tai useamman amiinin vesiliuos. (Lampinen 2015, 144.)

Ympäristöä ajatellen amiinipesu on paras jalostusteknologia, koska sillä on pienin metaani-hävikki. Lisäksi se kuluttaa vähiten sähköä jalostusteknologioista. Amiinipesulla on jalostusteknologioista pienin sähkönkulutus, mutta suurin lämmönkulutus. Teknologia on kasvussa muun muassa Ruotsissa ja Saksassa. Amiinipesulla ei voida vähentää typpipitoisuutta, mutta sillä saadaan korkealaatuisin jalostus eli korkein metaanipitoisuus, kun raakakaasussa ei ole typpeä. Amiinipesu soveltuu käytettäväksi vain suuren kokoluokan laitoksissa, koska se on teknisesti vaativa prosessi. (Lampinen 2015, 144.)

Fysikaalinen adsorptio

Fysikaalinen adsorptio perustuu molekyylien kokoeroihin, mikä tarkoittaa kaasukomponenttien poistamista kiinteän huokoisen väliaineen, adsorbentin, avulla, kuten esimerkiksi aktiivihieillä ja molekyyliseulalla (kuvio 6). Teknologia on ollut käytössä 1980-luvulta alkaen. (Lampinen 2015, 145.)

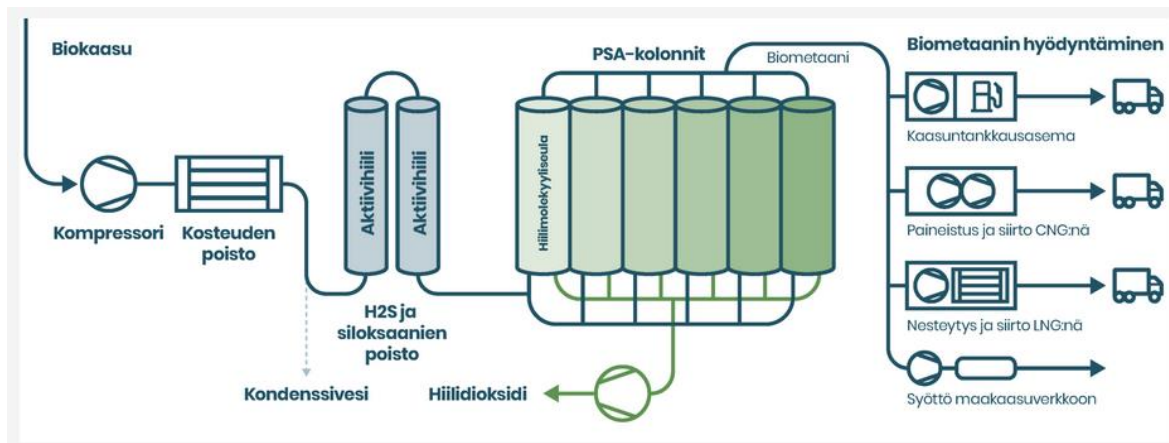


Kuvio 6. Vaihtoehdot fysikaaliselle adsorptiolle (PSA = Pressure Swing Adsorption, TSA = Temperature Swing Adsorption) (Lampinen 2015, 145)

Fysikaalisessa adsorptiossa kaasumolekyylit kiinnittyvät adsorbentin pintaan, jolloin vapautuu lämpöä, kuitenkin reagoimatta kemiallisesti. Aktiivihieili on yleisin käytetty adsorbentti biokaasun jalostuksessa. Vaihtoehtoja aktiivihieille ovat zeoliitit, silikonigeelit, MOFit (Metal-organic frame-work) ja molekyyliseulat. Molekyyliseulat ovat suuren erotustarkkuuden adsorbentteja, jotka on valmistettu tietyn yhdisteen erottamista varten. Näitä ovat synteettiset zeoliitit, mutta muitakin materiaaleja voidaan käyttää nanoteknologian yleistyttyä. Molekyylien koot ovat lähellä toisiaan, mikä aiheuttaa molekyylien päällekkäisyyttä. Tämän takia jalostettuun kaasuun jää noin 4 % typpeä. (Lampinen 2015, 146.)

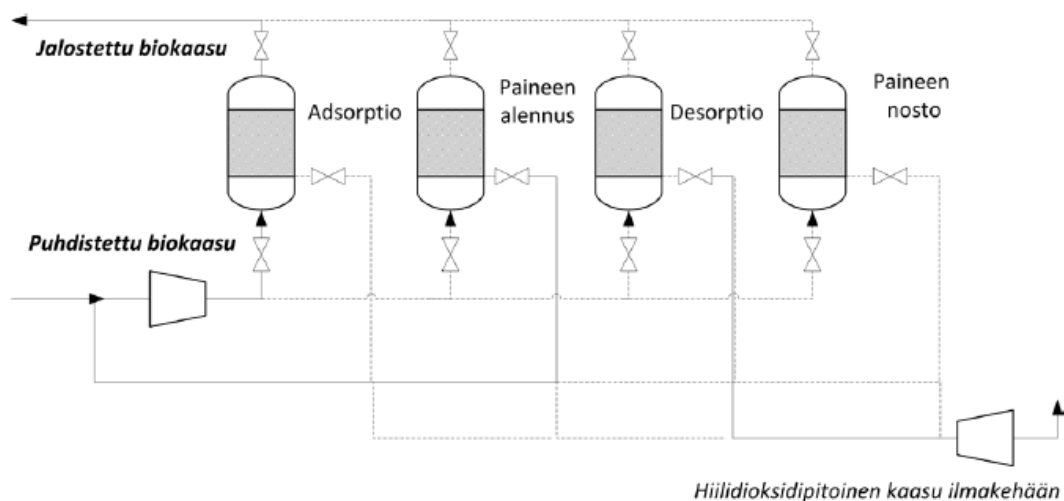
Adsorbenttien regenerointiin voidaan käyttää joko painevaihteluita (PSA) tai lämpötilavaihteluita (TSA). Jälkimmäistä ei käytetä biokaasun jalostuksessa. Sitä kuitenkin hyödynnetään biokaasun puhdistuksessa, erityisesti veden poistossa. Jalostukseen käytettävää adsorptioprosessia kutsutaan monesti PSA:ksi, koska nykyään vain sitä käytetään jalostusprosessissa. (Lampinen 2015, 146.) PSA-tekniikkaa käytetään useasti biokaasun

jalostuslaitoksissa. Kuvassa 6 nähdään PSA-tekniikkaan perustuva biokaasun jalostuslaitteisto. (Biowoima 2021.)



Kuva 6. PSA-jalostuslaitteisto (Biowoima 2021)

Biokaasun tulee olla puhdistettu epäpuhtauksista ja vesihöyrystä ennen adsorptioprosessia. Paineistettu ja puhdistettu biokaasu syötetään aktiivihiltä tai muuta adsorbenttia sisältävään adsorptioastiaan. Yhden tai useamman adsorptioastian regenerointi tapahtuu samanaikaisesti. Yleensä käytetään neljää astiaa (kuvio 7), joista yksi on adsorptioastia ja muissa tapahtuu regenerointi. Desorptiossa painetta alennetaan useassa vaiheessa ja hiilidioksidipitoinen kaasu huuhdotaan pois. Ensimmäisen regeneraatiovaiheen jälkeen kaasu kierrätetään uudelleen takaisin järjestelmään, mikä pienentää samalla metaanihävikkiä. (Lampinen 2015, 146.)

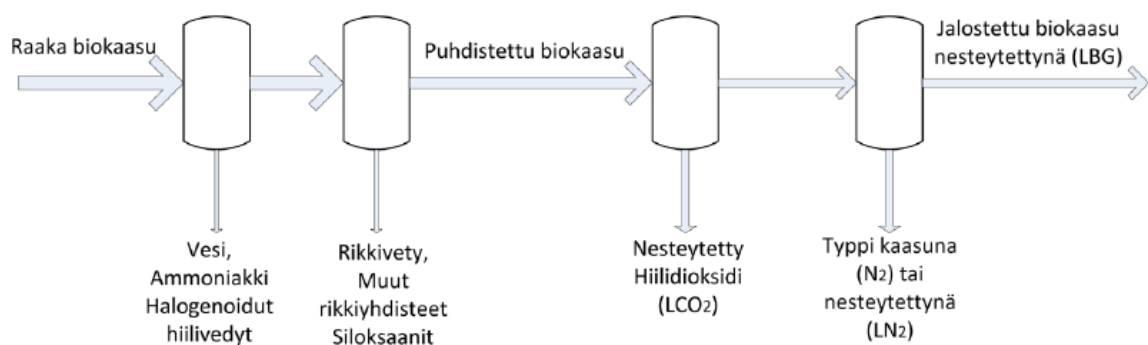


Kuvio 7. Prosessikaavio hiilidioksidin fyysikaalisesta adsorptiosta, kun käytetään neljää astiaa PSA-regeneraatioissa (Lampinen 2015, 146)

Kryojalostus

Kryojalostus perustuu kiehumis- ja sulamispisteiden eroihin. Teknologiaa on käytetty 1920-luvulta alkaen metaanipolttoaineiden jalostukseen, mutta biokaasun jalostukseen kryojalostusta alettiin käyttämään vasta 2000-luvulla. Tämä johtuu teknisestä vaativuudesta ja soveltamisen vaikeudesta pienikokoisiin laitoksiin kustannustehokkaasti. (Lampinen 2015, 147.)

Kryojalostus lasketaan kuitenkin parhaaksi jalostusmenetelmäksi ja käytännössä se toimii parhaiten typen erottamiseen biokaasusta. Yhdessä kryojalostus ja amiinipesu ovat parhaita minimoimaan metaanihävikkiä ja erottamaan hiilidioksidia. Kuviossa 8 nähdään hollantilaisen laitoksen yksinkertaistettu kryojalostuksen ja -puhdistuksen prosessikaavio. (Lampinen 2015, 147.)



Kuvio 8. Yksinkertaistettu prosessikaavio kryojalostuksesta ja -puhdistuksesta (Lampinen 2015, 148)

Kryojalostuksessa erotellaan kiinteitä, nestemäisiä ja kaasumaisia olomuotoja. Biokaasuseoksen typpi ja metaani saadaan erilleen jäähdyttämällä seos alle metaanin kiehumispisteen, joka on $-161,6\text{ °C}$ normaalipaineessa, jolloin syntyy nesteytettyä biokaasua (LBG). Tätä ennen tulee kaasuseoksesta kuitenkin erottaa hiilidioksidi, koska se jäätyy -78 °C lämpötilassa normaalipaineessa. Hiilidioksidi nesteytyy esimerkiksi 6 barin paineessa -57 °C lämpötilassa. Kaasu ei myöskään saa sisältää lähes mitään epäpuhtauksia, koska niillä on vielä alhaisempi jäätymispiste ja ne tukkivat putkistoja. Tämän takia kryojalostus vaatii puhdistusprosessilta enemmän verrattuna muihin jalostusmenetelmiin, mutta sivutuotteet ovat puhtaampia tällä menetelmällä, esimerkiksi LCO₂ (nesteytetty hiilidioksidi). Metaanin nesteytyksen yhteydessä poistuvat typen kanssa ne epäpuhtaudet, joilla on alempi kiehumispiste kuin metaanilla. Jos tyypestä halutaan nestemäistä sivutuotetta, nämä epäpuhtaudet poistuvat ilmakehään typen nesteytyksen yhteydessä. (Lampinen 2015, 148.)

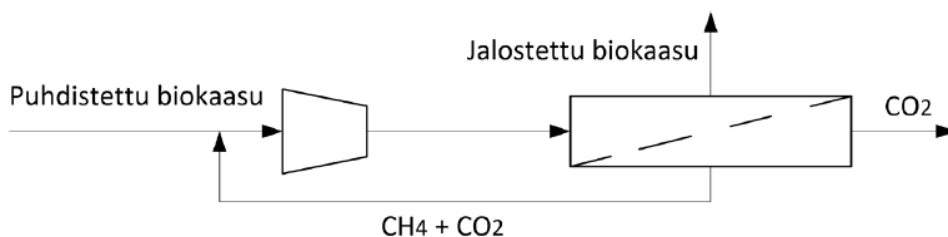
Nesteytetty hiilidioksidi (LCO_2) on arvokas sivutuote. Esimerkiksi Ruotsissa nesteytetty hiilidioksidi toimii kylmäkuljetusautojen jäädytysaineena ja sitä voidaan tankata samoista paikoista kuin polttoainettakin. Tämä vähentää dieselöljyllä toimivien kompressoreiden käyttöä. Hollanti on kryojalostuksen johtava maa. Kuvassa 7 on Haarlemissa, Hollannissa, sijaitseva kryojalostamo. (Lampinen 2015, 149.)



Kuva 7. Kryojalostamo Haarlemissa, Hollannissa (Lampinen 2015, 149)

Kalvojalostus

Kalvojalostus perustuu molekyylien kokoeroihin. Metaanin ja hiilidioksidin erottaminen toisistaan ei ole helppoa, koska niillä on lähes samankokoiset molekyylit. Käytännössä erottaminen tapahtuu ohjaamalla kaasu usean kalvoerottimen läpi. Jos näin ei tehdä, niin metaanihävikki voi nousta suuremmaksi kuin millään muulla jalostusmenetelmällä. Yksinkertaistettu prosessikaavio (kuvio 9) kuvaa kaasun ohjaamista kalvon läpäisyn jälkeen takaisin samaan kalvoon. Todellisuudessa näitä kalvoja on kuitenkin useampi peräkkäin. (Lampinen 2015, 149.)



Kuvio 9. Yksinkertaistettu prosessikaavio kalvojalostuksesta silloin, kun biokaasu ei sisällä tyypeä merkittäviä määriä (Lampinen 2015, 149)

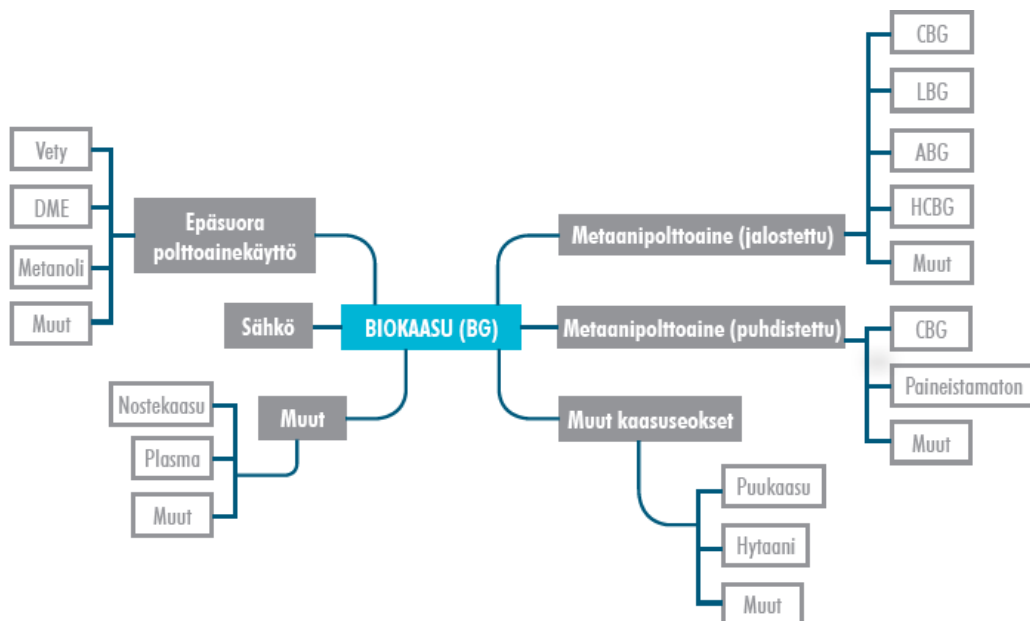
Kalvo valitaan tarkoitusta varten. Hiilidioksidimolekyylillä läpäisee paremmin kalvon kuin metaanimolekyylillä ja typpi, koska se on hieman pienempi. Jos typpi halutaan erottaa, voidaan se tehdä siihen tarkoitettuun kalvolla seuraavassa vaiheessa. Typpiä jää kuitenkin jalostettuun biokaasuun muutama tilavuusprosentti, koska typen ja metaanin erottaminen on vaikeampaa kuin metaanin ja hiilidioksidin. Kalvojalostamo voidaan rakentaa hyvin pienessä kokoluokassa (kuva 8). (Lampinen 2015, 149.)



Kuva 8. Kalvojalostamo Forssassa, Kalvo Envor Biotech (Lampinen 2015, 150)

6.4 Biometaani liikennekäytössä

Liikenneajoneuvoissa biokaasua käytetään jalostettuna. Jalostettu biokaasu on keskimäärin noin 97 % metaania, kuten taulukosta 4 nähtiin, ja sillä on suurempi energiatiheys kuin puhdistetulla tai raakabiokaasulla. Biokaasulla on monia teknisiä käyttömahdollisuuksia liikennepolttoaineena (kuvio 10). (Lampinen 2015, 158.)

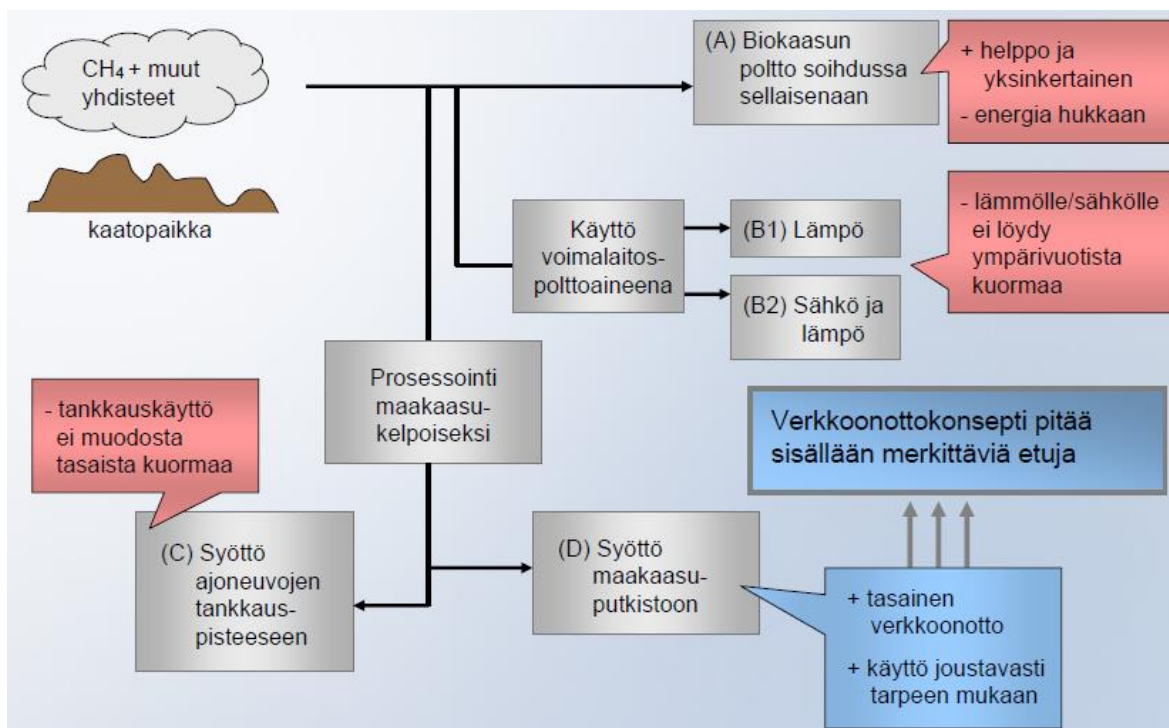


Kuvio 10. Liikennebiokaasun tekniset käyttömahdollisuudet (Lampinen 2015, 158)

Metaania käytetään globaalisti kolmanneksi eniten liikennepolttoaineena bensiinin ja dieselöljyn jälkeen. Toisin sanoen se on siis vaihtoehtoisista polttoaineista eniten käytetty. Tehtaissa valmistettuja metaanilla toimivia ajoneuvoja on olemassa lähes 2000 (vuonna 2015) ja lisäksi jälkimuunnoksella saadaan mistä tahansa autosta metaaniajoneuvo, jossa yleensä käytetään lisäksi alkuperäistä polttoainetta. (Lampinen 2015, 160.)

Biokaasu varastoidaan ajoneuvoissa paineistettuna. Standardit maantieajoneuvojen varastointipaineille ovat 200 ja 250 bar:ia, joista jälkimmäistä käytetään raskaille autoille. Muissa ajoneuvoissa 200 bar:ia korkeampia paineita voidaan käyttää, esimerkiksi vetyautoille on standardoitu 700 bar:in paine. (Lampinen 2015, 160.) Motiva (2020b) ilmoittaa, että liikennekäytössä metaani paineistetaan noin 200 barin paineeseen.

Jalostettu biokaasu ja maakaasu muodostuvat samasta yhdisteestä eli metaanista (CH₄) ja biometaanin hyödyntäminen liikenteessä edellyttää maakaasun tankkausasemaverkostoa. Biometaanin eri käyttövaihtoehdot nähdään kuviosta 9. (Gasum 2007.)



Kuva 9. Biometaanin käyttövaihtoehdot (Gasum 2007, 31)

Kemiallisesti tarkasteltuna maakaasu ja jalostettu biokaasu ovat samanlaisia. Näin ollen niitä voidaan tankata sekaisin. Käyttökohteen mukaan molempia polttoaineita voidaan käyttää sekä paineistetussa että nesteytetyssä muodossa. (Gasum 2020.) Nesteytettyä maakaasua (LNG) ja biokaasua (LBG) käytetään lähinnä laivoissa. Joissakin hyötyajoneuvoissa käytetään LNG:tä (LBG), mutta korkeiden tankkien eristysvaatimusten takia (käyttölämpötila alle $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$ astetta) se on hankala liikennekäytössä. Vuonna 2019 Turkuun valmistui Gasum:in sekä Suomen ensimmäinen LBG-tuotantolaitos. LBG-tuotantolaitokset ovat muualla Euroopassa harvinaisia, mutta Ruotsista ja Norjasta sellaiset löytyvät jo. (Gasum 2019.)

7 Biokaasun tuotantoon soveltuvia biomassoja ja niiden ominaisuuksia

7.1 Yleistä biomassoista

Maataloudessa syntyy kasvin- ja eläintuotannon sivutuotteena merkittävä määrä biokaasun tuotantoon soveltuvaa orgaanista ainesta. Näitä ovat esimerkiksi lanta, hävikkirehu ja kasvijätteet. Maatiloilla voi lisäksi olla mahdollista tuottaa erilaisia energiakasveja biokaasun tuotantoon. (Luostarinen 2015, 33.)

Määrällisesti suurimmat peltobiomassan lähteet ovat olki, lanta sekä pelloilla viljeltävät energiakasvit. Yleisin energiakasvi 2000-luvun alusta lähtien on ollut ruokohelpi. Muiden energiakasvien viljelyalat ovat jääneet vaatimattomiksi ja siksi lanta ja olki ovat nousseet tärkeimmiksi maataloudesta peräisin olevien biomassojen lähteiksi. (Mikkola 2012, 20.) Myös erilaiset teollisuuden sivutuotteet soveltuvat biokaasun tuotantoon (Kymäläinen 2015, 44).

7.2 Lanta

Lanta voi olla joko käsiteltyä tai käsittelemätöntä eläimen sontaa (kiinteä uloste ilman virtsaa) ja virtsaa, mikä saattaa sisältää myös vettä ja kuiviketta (Virtanen 2017). Lannan koostumus ja määrä vaihtelee eläinlajin ja -suojan mukaan (Luostarinen 2015, 34).

Biokaasuprosessissa lantamäärän ei oleteta muuttuvan prosessin aikana nitraattiasetuksen mukaisesti ja mädätysjäännöksen varastointiin sovelletaan lannan varastoinnin vaatimuksia (Luostarinen 2015, 35).

Lannalla on alhainen biokaasun tuotantopotentiaali, mutta se toimii hyvänä perusmateriaalina, koska lanta sisältää paljon anaerobisen prosessin mikrobien tarvitsemia ravinteita ja sillä on hyvä puskurikyky (Luoma ja muut 2006, 69). Lannan biokaasutuotto riippuu myös siitä, minkä eläimen lanta on kyseessä. Sian lanta tuottaa biokaasua (m^3/tn VS=volatile solids, haihtuva kuiva-aine) paremmin kuin naudan lietelanta. Ero kuitenkin kompensoituu korkeammalla kuiva-ainepitoisuudella. Yksi lehmäpaikka tuottaa biokaasua yli kymmenkertaisen määrän verrattuna sikaan. Hevosien lantatuotto on vähemmän kuin lehmän, mutta yhden hevosen kuivikelannalla on oikealla tekniikalla suurempi biokaasutuottopotentiaali kuin yhden lehmän vuodessa tuotetussa lantamäärässä. (Kari ja Häkkinen 2021, 1.)

Kuiva-, kuivike- ja kuivikepohjalannalla on korkeampi kuiva-ainepitoisuus kuin lietelannalla, joten niillä on siten korkeampi metaanintuotto tuorepainoa kohden kuin lietelantapohjaisella materiaalilla. Orgaanisen aineksen metaanintuotto ei välttämättä vaihtelee kovinkaan paljon saman eläimen lietelannan ja kiinteän lannan välillä, mutta pääasiassa tämä riippuu

kuivikkeen sisällöstä. Kuivike voi hajota biokaasuprosessissa lisäten lannan metaanintuottoa, olla heikosti hajoavaa tai hajoamatonta. Biokaasuprosessissa hajoava kuivikemateriaali on esimerkiksi olki, heikosti hajoava kuivikemateriaali turvetta ja hajoamaton kuivike kutterilastua tai sahanpurua. (Luostarinen 2015, 36–37.)

7.3 Peltobiomassat

Peltobiomassa tarkoittaa kivennäis- ja turvemaiden pelloilla kasvavia energiakasveja (Bioenergianeuvoja 2021c), joista voidaan tehdä polttoainetta tai niistä voidaan jalostaa kiinteitä ja nestemäisiä polttoaineita (Mikkola 2012, 17). Tällaisia kasveja ovat esimerkiksi ruokohelmi, hamppu, rypsi ja paju (energiapaju) sekä viljakasvien osat kuten oljet (Bioenergianeuvoja 2021c). Ruokohelpeä viljellään energiakasveista eniten (Mikkola 2012, 19), mutta energiakasvina eniten potentiaalia Suomessa on nurmella Luostarisen (2015, 37) mukaan.

Heinäkasvit soveltuvat hyvin biokaasun tuotantoon etenkin, jos ne on korjattu vihermassana. Säilörehumenetelmällä varastoidun kasvibiomassan on huomattu parantavan niiden kaasuntuotantoa. (Paavola 2006, 70.)

Peltobiomassoilla on suurempi biokaasutuottopotentiaali kuin lannalla. Ne lisäävät biokaasun tuotantoa reaktoritilavuudessa. Kun peltobiomassoja yhdistetään lantaperäiseen syötteeseen, biokaasuprosessissa saadaan vähennettyä fosforin pitoisuutta ja lisättyä typpi-pitoisuutta mädätteessä. Tämä on hyödyllistä erityisesti luomutuotannossa, missä satoa eniten rajoittaa typpi myös kotieläintiloilla. Kesantonurmien, joilla kasvaa paljon apilaa, korjuu vihermassana edistää myös typensidontaa, kun helppoa typen lähdeä ei ole kasvustosta saatavilla. (Kari ja Häkkinen 2021, 2,4,11.)

Välttääkseen kilpailun elintarviketuotannon kanssa, peltobiomassoja on hyvä viljellä tällaisesta toiminnasta vapautuneilla pelloilla, kesantopelloilla tai entisellä turvetuotantosuolla (Bioenergianeuvoja 2021c). Energiakasveja ei kannata viljellä, jos sama peltopinta-ala täytyy korvata jossain muualla ruuan- ja rehuntuotantoon. Tällöin ne olisivat kokonaisvaikutuksiltaan ympäristölle haitaksi. (Luostarinen 2005, 33.)

Nurmi

Maatiloilla nurmea syntyy yleensä sivutuotteena, ja usein niille ei ole löydetty käyttötarkoitusta, joten ne jäävät hyödyntämättä. Rehunurmestakin muodostuu jonkun verran ylijäämää, joka usein jää hyödyntämättä. (Luostarinen 2015, 38.)

Märkämädätyslaitoksessa nurmimassan ja kuivemman materiaalin käyttöä rajoittavat niiden erottumistaipumus reaktorissa ja orgaanisen aineen kuorma nousee liian korkealle per reaktorikuutio. Kuivämädätyksessä erottumistaipumus ei ole ongelma ja voidaan

helpommin säädellä kuormitusta. (Kari ja Häkkinen, 11.) Seppälä ja Luostarinen (2014, 10) puolestaan toteavat, että nurmea voidaan hyödyntää syöteseoksena lietelannan kanssa tai vaihtoehtoisesti reaktorityyppi valitaan korkean kuiva-ainepitoisuuden mukaan.

Olki

Olkimateriaalia syntyy viljantuotannon sivutuotteena ja se on yleensä silputtu peltoon sadonkorjuun yhteydessä. On arvioitu, että 2/3 oljesta voitaisiin hyödyntää energiana. (Mikkola 2012, 21.) Oljen kuiva-ainepitoisuus on 86–90 %, josta orgaanista ainetta on 92 % (Luostarinen 2015, 38). Viljan ja rypsin olki soveltuvatkin kuivamädätykseen (Kari ja Häkkinen 2021, 4).

Oljella on biokaasun tuotannossa suuri potentiaali (Kymäläinen 2015, 38). Kari ja Häkkinen (2021, 11) toteavat rypsin oljella ja viljan lajittelujätteellä olevan kaksinkertainen biokaasupotentiaali verrattuna nurmimassaan.

Oljen käytöllä mädätysprosessissa on kuitenkin joitakin ongelmia, mitkä johtuvat sen korkeasti lignuselluloosa pitoisuudesta. Ongelmia ovat alhainen biohajoavuus ja kaasun tuotto sekä pitkä viipymisaika. Oljen ollessa vedessä, se laajenee ja paisuu. Näihin ongelmiin on kuitenkin keksitty potentiaalisia ratkaisuja, esimerkiksi esikäsitteily (pilkkominen, lahottajasisienet, kemialliset menetelmät), reaktorin optimointi (jatkuvasekoitteinen tulppavirtaus) sekä toiminnallisten parametrien optimointi. Näiden avulla voitaisiin lisätä oljen biohajoavuutta, saavuttaa biologiset vaatimukset sekä paras toimintakyky. (Li 2021.)

Ruokohelpi

Ruokohelpi on monivuotinen, talvenkestävä ja satoisa viljakasvi (Pahkala 2006, 38). Sitä käytetään Suomessa rehuna ja energian tuotantoon (Bioenergianeuvoja 2021d). Energiankäyttöä varten ruokohelpi korjataan keväällä kuloheinänä. Sen korjuu matalaksi sängeksi antaa parhaimman sadon. Keväällä korjattu biomassa sisältää kosteutta vain 10–15 %. (Pahkala 2006, 38.) Ruokohelpi tuottaa satoa noin 5–6 tn / ha. Yksi hehtaari ruokohelpipeltoa tuottaa energiaa noin 30 MWh. (Bioenergianeuvoja 2021d.)

7.4 Teollisuuden sivuvirrat

Kaikessa biomassojen jalostustoiminnassa syntyy orgaanisia sivutuotteita ja jätteitä, jotka soveltuvat biokaasun tuotantoon. Tällainen toiminta voi olla esimerkiksi elintarvike-, panimo- tai teurastamotoiminta. Teollisuudessa syntyvät sivuvirrat ovat biokaasun tuotannon kannalta homogeenisempia ja tasalaatuisempia syötteitä kuin yhdyskuntabiojäte. Teollisuudesta saatavia sivuvirtoja on käytetty maatilojen biokaasureaktoreissa. Sivuvirrat tehostavat

biokaasutuottoa reaktoreissa, joissa käytetään lantaa syötemateriaalina. (Kymäläinen, 2015, 44.)

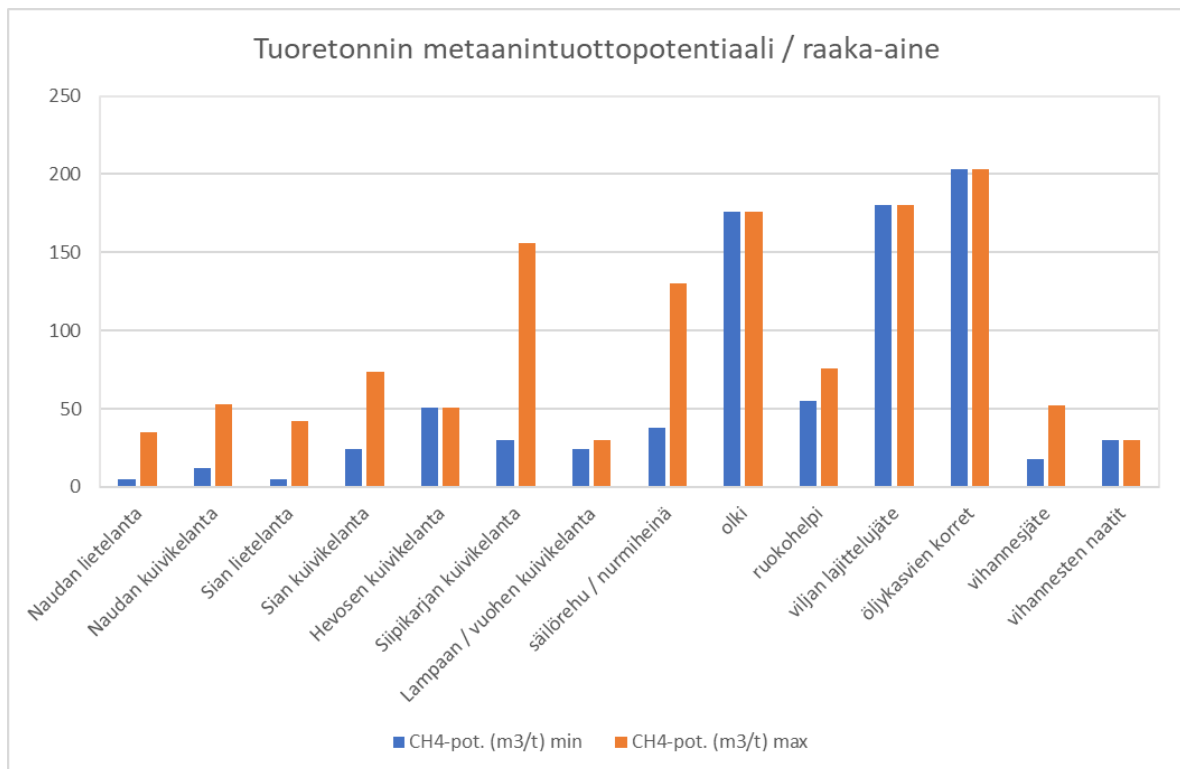
7.5 Biomassojen metaanintuottopotentiaaleja

Biokaasutuotto sekä biokaasun metaanipitoisuus riippuvat raaka-aineesta ja niiden koostumuksesta. Orgaanisten yhdisteiden, kuten hiilihydraattien ja proteiinien, hajotessa biokaasuprosessissa syntyy eri määrä biokaasua ja metaanipitoisuus biokaasussa vaihtelee. (Kymäläinen ja Luostarinen 2015, 21.) Pyykkönen (2015, 85) kertoo syötteiden metaanituoton riippuvan orgaanisen kuiva-aineen (VS) pitoisuudesta ja sen biohajoavuudesta. Erilaisten syötteiden ominaisuuksia nähdään taulukosta 10 ja kuviossa 11 on havainnollistettu syötteiden metaanintuottopotentiaalain vaihteluväliä (Riihimäki, Mahal, Suoniemi, Nurmio, Sirkiä, Marttinen, Pyykkönen, Hurskainen, Alm, Seppänen, Lappi, Ek, Järvenpää 2014, 8).

Syöte	TS (%)*	VS/TS (%)**	CH ₄ -pot. (m ³ /tVS)***	CH ₄ -pot. (m ³ /t)****
naudan lietelanta	5,0 - 14	75 - 85	120 - 300	5,0 - 35
naudan kuivikelanta	17 - 25	68 - 85	100 - 250	12 - 53
sian lietelanta	4,0 - 10	75 - 86	180 - 490	5,0 - 42
sian kuivikelanta	20 - 34	75 - 81	162 - 270	24 - 74
hevosen kuivikelanta	33	78	200	51
siipikarjan kuivikelanta	32 - 65	63 - 80	150 - 300	30 - 156
lampaan / vuohen kuivikelanta	35	77	88 - 113	24 - 30
säilörehu / nurmiheinä	20 - 40	90	213 - 360	38 - 130
olki	85	90	230	176
ruokohelppi	20 - 40	90	253 - 351	55 - 76
viljan lajittelujäte	87	90	230	180
öljykasvien korret	90	90	250	203
vihannesjäte	11	92	180 - 514	18 - 52
vihannesten naatit	11	90	300	30

*TS (%) = kuiva-ainepitoisuus
 **VS/TS (%) = orgaanisen aineen osuus kuiva-aineesta
 ***CH₄-pot. (m³/tVS) = orgaanisen aineen metaanintuottopotentiaali
 ****CH₄-pot. (m³/t) = tuoretonnin metaanintuottopotentiaali

Taulukko 10. Erilaisten syötteiden ominaisuuksia (Mukailtu: Riihimäki ja muut 2014, 8)



Kuvio 11. Syötteiden tuoremateriaalin metaanintuottopotentialin vaihteluvälit / 1 tonni raaka-ainetta (Mukaiutu: Riihimäki ja muut 2014, 8)

Kuviosta 11 voidaan päätellä, että mitä enemmän syötemateriaali sisältää orgaanista ainesta (kuiva-ainetta), sitä parempi on sen metaanintuottopotentiali, kuten muun muassa Pyykkönen (2015) toteaa esitelmässään. Huomataan myös, että yleisesti peltobiomassojen ja vihannestajätteen biometaanin tuottopotentiali on suurempi kuin vastaavalla määrällä lantamateriaalia, kuten aiemmin todettiin. Kuvion 11 sekä taulukon 10 tiedot perustuvat useiden kirjallisuuslähteiden tietoihin sekä tekijöiden kokemuksiin. (Riihimäki ja muut 2014, 8).

Metaanin kuten myös biokaasun sisältämän metaanin määrä ilmoitetaan normaalikuutioina (Nm^3), mikä tarkoittaa olosuhdetta normaali ilmanpaineessa ja lämpötilassa (101,3 kPa ja 0°C). Lämpöarvo ilmoitetaan joko massana tai tilavuutena joulea kohti (J / kg tai J / m^3). Lämpöarvo voidaan myös ilmoittaa kilowattitunteina per kuutio (kWh / Nm^3). (Bioste 2021.) Puhtaan metaanin energiasisältö on $36 \text{ MJ} / \text{m}^3$, joka vastaa 10 kWh (Kymäläinen 2015, 32). Tästä saadaan puhtaan metaanin energiasisällöksi $10 \text{ kWh} / \text{m}^3$ (kuva 10) (Motiva 2013, 25).

Lietelantatonni tuottaa biokaasua noin $12 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4$, joka on energiana 120 kWh ja vastaa 12 litraa kevytpolttoöljyä (Pyykkönen 2015). Yhden hevosen päivässä tuotetun kuivikelantan sisältämä energia on noin 30 kWh eli noin kolme polttoöljylitraa. Yksi lehmä tuottaa

lantaa päivässä noin 10 kWh verran, joka vastaa noin yhtä polttoöljylittraa. (Bioenergianeuvoja 2021a ja b.)

Energiasisältö:

1 m³ metaanikaasua = 1 litra öljyä = 10 kWh

1 m³ biokaasua ~ 6 kWh

1 m³ biokaasua ~ 2 kWh sähköä

Kuva 10. Metaanin ja biokaasun energiasisältöjä (Motiva 2013, 25)

Metaani- ja biokaasutuotot (tilavuutena) voidaan helposti muuttaa energiatuotoksi. Puhdas metaani (100 %) sisältää energiaa 10 kWh, jolloin biokaasu, jonka metaanipitoisuus on esimerkiksi 60 %, kaasun energiasisältö on 6 kWh. (Kymäläinen 2015, 32.)

Yhdestä kuutiosta lietelantaa saadaan noin 20 m³ biokaasua, joka vastaa 128 kWh energiaa ja 12,8 litraa polttoöljyä. Vastaavasti säilörehupaalikuutio tuottaa biokaasua noin 100 m³, joka on energiana 640 kWh ja vastaa 64 litraa polttoöljyä. (Seppälä 2017.) Seppälä (2015) laskee säilörehutonnin metaanintuottopotentialiksi 90 Nm³ CH₄, joka energiana on 900 kWh. Yhdellä nurmimassatonnilla on puolestaan noin seitsemän kertaa suurempi biokaasupotentiaali kuin naudon lietelannalla (Kari ja Häkkinen 2021, 11). Kuviosta 11 voidaan päätellä, että yksi nurmimassatonni tuottaa noin 3–5 kertaa enemmän biokaasua kuin naudon lietelanta, mutta jos nurmimassassa on mukana muun muassa olkimateriaali, voi 7-kertainen biokaasun tuotantopotentiaali olla mahdollista.

Ruokohelpi tuottaa satoa noin 5–6 tonnia per hehtaari ja sen lämpöarvo on 4,5 MWh / tn (kosteus 10%). Ruokohelvestä saadaan energiaa noin 20–30 kWh/ha. (Bioenergianeuvoja 2021d.)

Peltobiomassat tuottavat hyvin biokaasua kuutiota kohti (m³ / tn märkápaino), mutta niillä on kuitenkin hieman alhaisempi metaanipitoisuus biokaasussa kuin esimerkiksi naudon lannalla (taulukko 11). Syötteen murskaaminen ja hienontaminen edesauttaa parempaa aineen saatavuutta hajottaville pieneliöille, jolloin kaasuntuotanto lisääntyy. Kaasuntuotannon määrä on riippuvainen raaka-aineesta. Esimerkiksi niukasti vettä ja paljon helposti hajoavaa orgaanista ainetta sisältävä syöte tuottaa paljon kaasua. Naudon lietelannan mesofiilinen mädätys ei juuri tuota enempää biokaasua päivässä reaktoritilavuutta kohti kuin yhden kuution verran. Jos syötteeseen sekoitetaan enemmän energiaa sisältävää materiaalia, kuten elintarviketeollisuuden jätteitä, voidaan mahdollisesti lisätä biokaasun tuotantoa vuorokaudessa noin 2–3 m³ reaktorin lietetilavuutta kohti. (Motiva 2013, 10.)

Materiaali	Biokaasuntuotanto m ³ / tonnia märkápaino	Kaasun metaani- pitoisuus %
Teurasjäte	250	70
Biojäte	150-250	65
Peltobiomassa	50-250	55
Sianlanta	25-35	65
Naudanlanta	15-25	60

Taulukko 11. Erialaisten raaka-aineiden biokaasutuottoja ja niiden metaanipitoisuuksia (Motiva 2013)

8 Tulokset ja tulosten tarkastelu

8.1 Saatavan biomassan raaka-aineet ja määrä

Kyselytutkimuksen vastaukset on koottu yhteen taulukossa 12. Taulukossa ilmoitetaan myös eri lantojen kuivikemateriaalit, koska niillä on vaikutusta biometaanin muodostumiseen. Esimerkiksi sahanpuru ei tuota biokaasua prosessissa, koska se ei ole yhtä nopeasti hajoavaa orgaanista ainesta kuin lantojen tai peltobiomassojen orgaaninen aines.

Vastaaja	Hyödyntämättömät biomassat ja niiden määrät			
	Hyödyntämättömiä / vajaasti hyödynnettyjä biomassoja	määrä (tn / vuosi)	kuivikemateriaalit	biomassojen koostumus (märkä, kuiva tai näiden sekoitus)
1	kuivikelanta	useampi tonni		sekoitus
2	olki, nurmi	50		sekoitus
3	hevosten kuivikelanta, olki, turve, heinä	840		kuiva
4	kasvisten ylijäämät	50		sekoitus
5	mm. hevosten kuivikelanta, olki	noin 70	turve/pelletti/puru	sekoitus
6	lehmän kuivikelanta, nurmi	200-500		
	keskiarvo	350		
7	hevosten kuivikelanta	150	sahanpuru	kuiva
8	hevosen kuivikelanta, heinä	50		
	Keskiarvo	1490		
	plus useampi tonni (~7) ja noin 70tn =	1560		

Taulukko 12. Hyödyntämättömät / vajaasti hyödynnetyt biomassat ja niiden määrät

Muodostuvat biomassat ovat enimmäkseen kuivikelantaa ja jonkin verran muodostuu myös olkea, nurmea, hieman heinää ja turvetta. Yksi vastanneista on teollinen toimija, jonka toiminnasta syntyy sivutuotteena kasvisten ylijäämiä. Kuudella vastaajista syntyy toiminnassaan kuivikelantaa, joista neljä on vastannut biomassan koostumus -kysymykseen. Neljällä yrityksellä kuivikkeen / biomassan koostumus on sekoitusta (märkä ja kuiva) ja kaksi kertoo kuivikkeen / biomassan koostumukseksi kuivan. Biomassaa syntyy erilaisia määriä eri toimijoilla, vaihdellen yleisesti muutamista kymmenistä tonneista aina joihinkin satoihin tonneihin asti. Ensimmäisen vastaajan ”useampi tonni” vastaus on laskuissa laskettu keskimäärin 7 tonnin mukaan vuodessa, koska tarkkaa arvoa ei ole tiedossa.

Kyselyn perusteella saatavien biomassojen keskiarvo on noin 1 500 tonnia vuodessa. Tässä määrässä on kuitenkin kaikki saatavat biomassat yhdessä eikä eriteltynä kasvibiomassat ja lanta erikseen, jotka tuottavat eri määriä biokaasua. Esimerkiksi kasvibiomassoilla on suurempi biokaasun tuotantopotentiaali kuin lannalla, mutta biomassoja muodostuu yhteensä vastanneiden kesken paljon.

Erilaisia raaka-aineita mahdolliselle biokaasulaitokselle olisivat lehmän ja hevosen kuivikelanta sekä olki, nurmi ja kasvisten ylijäämäosat. Biomassan määrästä hevosen

kuivikelantaa olisi eniten saatavilla vuodessa, noin 1 100 tonnia, lehmän kuivikelantaa keskimäärin 350 tonnia ja loput noin 100 tonnia muodostuvat pelto- ja kasvibiomassoista (olki, nurmi, vihannesjäte). Biomassojen / lannan saanto vaihtelee vastaajilla jonkin verran vuodenaikojen mukaan ja niiden koostumus (märkä/kuiva) ei vaihtele suuresti. Osalla muodostuu biomassoja / lantaa kesäkaudella vähemmän tai ei ollenkaan ja osalla syntyy ainoastaan kesä – syyskaudella biomassaa / lantaa. Joillakin biomassaa / lantaa muodostuu melkein tasaiseen tahtiin vuoden ympäri. Suurin osa vastaajista ilmoittaa, ettei biomassan / lannan koostumus juurikaan vaihtele vuodenaikojen mukaan ja joillakin koostumus voi olla kosteampaa kesällä / syksyllä, kun kuivikkeen osuus lannan määrässä on pienempi.

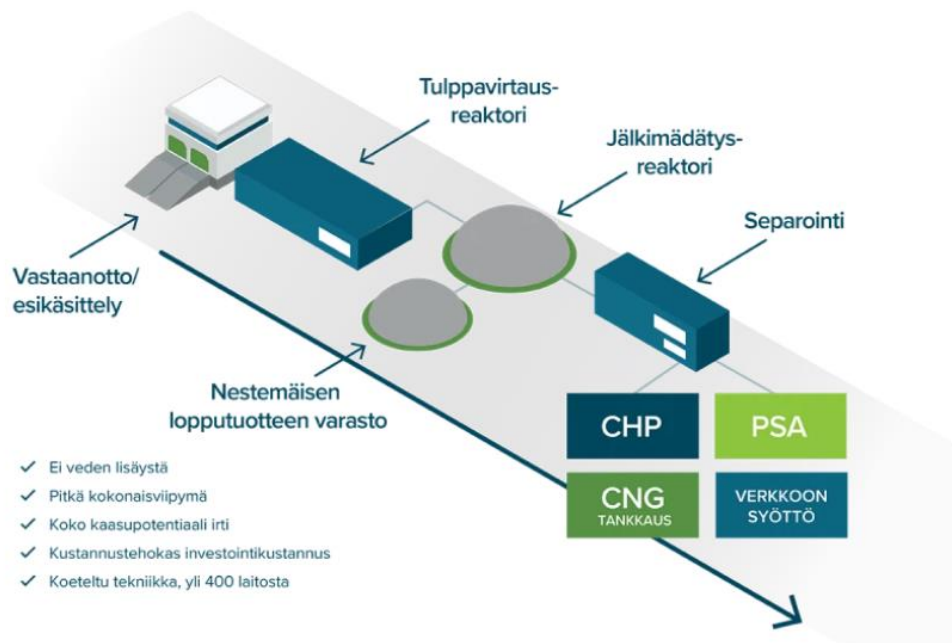
Mahdolliselle biokaasulaitokselle syötemateriaaleja vaikuttaisi kyselytutkimuksen perusteella muodostuvan suhteellisen tasaisesti ympäri vuoden, biomassojen kosteuspitoisuuden hieman vaihdeltaessa. Kuivikemateriaali sisältää jonkin verran sahanpurua, joka vaikuttaa heikentävästi biokaasuprosessissa biometaanin tuotantoon, koska puumateriaalit eivät tuota nopeasti biokaasua. Kuivikelantamateriaalin lisänä olisi alueelta saatavissa paljon orgaanista ainesta sisältäviä kasvipohjaisia biomassoja, joiden korkea hiilipitoisuus lisää metaanintuottoa, kun hiili / typpi – suhde (C / N) paranee. Tämä tosin vain, jos prosessi ei sisällä valmiiksi korkeaa typpipitoisuutta (raaka-aineiden typpipitoisuus). Muutoin metaanintuotto laskee, kun typestä muodostuu rajoittava ravinne. Lannalla on erittäin hyvä puskurointikyky (happojen neutralointi) ja toimii näin ollen erinomaisena perusmateriaalina biokaasuprosessissa. Biokaasuprosessi vaatii tasaisia olosuhteita, jotta optimaalinen metaanintuotto säilytetään. Biokaasunprosessin vakauteen vaikuttavia olosuhteita ovat esimerkiksi lämpötila, pH ja hapettomuus. Biokaasun tuotanto edellyttää myös sopivia reaktoriolosuhteita, mihin pystytään vaikuttamaan syötteiden koostumuksen avulla, esimerkiksi yhteiskäsittely. Prosessin optimaalinen toiminta vaatiikin jatkuvaa tarkkailua.

Suurimmaksi osaksi biomassaa on kuivikelantaa. Lanta toimii hyvänä perusmateriaalina biokaasuprosessissa sen hyvän puskurointikykynsä vuoksi ja se on suhteellisen tasalaatuista. Laatu voi saatavissa biomassoissa hieman enemmän vaihdella kuivikkeena käytettyjen materiaalien vuoksi. Sivutuotteena saatavista kasvibiomassoista, kuten myös peltobiomassoista, saadaan erittäin hyvä lisämateriaali syötteeseen, koska ne sisältävät paljon orgaanista materiaalia, joilla on huomattavasti suurempi biokaasu- ja metaanintuottopotentiaali kuin lannalla. Alueelta saatavista raaka-aineista eniten biometaania voisi potentiaalisesti tuottaa hevosen kuivalannat.

8.2 Biokaasulaitostekniikasta

Alueelta saatavat potentiaaliset biokaasun tuotannon raaka-aineet ovat enimmäkseen kuivikelantaa sekä kasvibiomassaa. Käytettävissä olevat materiaalit eivät näin ollen ole kosteita (esimerkiksi lietelanta), joten vaihtoehtoisista biomassan käsittelyprosesseista kuivatekniikat soveltuisivat saataville raaka-aineille paremmin. Kuivaprosesseja ovat jatkuva- ja panostoimiset. Panostoimisten reaktoreiden hajoamisprosessien hallinta on todettu vaikeaksi ja mädätysjäännös on useasti epätasalaatuista heikon hajoamisen vuoksi, jolloin suositeltava jatkokäsittely toimenpide olisi aumakompostointi. Tällöin hukataan kuitenkin merkittävä osa tyypestä aiheuttaen ammoniakkipäästöjä. Optimaalisin prosessi saatavien biomassojen käsittelyyn voisi olla jatkuvatoiminen kuivaprosessi tulppavirtausreaktorilla. Tulppavirtausreaktorilla voidaan käsitellä suhteellisen kuivia biomassoja, kuiva-ainepitoisuus jopa 35 %, ja se toimii yksivaiheisesti (yksi reaktori), jolloin prosessin hallinta on helpompaa. Esimerkiksi hevosen kuivikelannan kuiva-ainepitoisuus on noin 30–35 % (Hevostietokeskus 2018). Tulppavirtausreaktori on myös todettu potentiaalisimmaksi vaihtoehdoksi käsitellä olkimateriaalia niiden suhteellisen vaikean käsiteltävyyden vuoksi (Li 2021). Vielä ei ole kuitenkaan tietoa paljonko saatava biomassa sisältää olkimateriaalia, mutta tulevaisuuden kannalta, jos peltobiomassoja saadaan syötemateriaaleiksi enemmän, tulppavirtausreaktorin harkitseminen biomassojen käsittelylaitteeksi on suotavaa. Prosessi toimii myös ilman ulkoisen veden lisäystarvetta, mikä vähentää käyttökustannuksia

Syötemateriaaleja voisi käsitellä samalla reaktorilla, mikä olisi tehokas tapa tuottaa biokaasua saatavista materiaaleista. Näin saadaan raaka-aineista parhaimmat hyödyt ja optimoitua erilaisten biomassojen toimintaa biokaasuprosessissa. Prosessiolosuhteita tulee valvoa tarkasti, jotta säilytetään paras mahdollinen biokaasun tuotanto. Yhdeksi ongelmaksi prosessissa voi muodostua liiallinen typpipitoisuus, jota on esimerkiksi lannassa, mutta tyypin pitoisuus raaka-aineissa saadaan selville vasta laboratoriotutkimuksilla. Jos nurmimassa sisältää paljon apilaa, se voi myös vaikuttaa prosessin tasapainoon negatiivisesti, koska apila sisältää paljon typpiä. Saatavien nurmimassojen raaka-ainekoostumus on myös erittäin tärkeää selvittää ennen biokaasulaitoksen perustamista kuten muidenkin syötemateriaalien. Kuvassa 12 nähdään tulppavirtausreaktori -periaatteella toimiva biokaasun tuotantolaitos (Biowoima 2021).



Kuva 11. Biokaasulaitos tulppavirtausreaktorilla (Biowoima 2021)

Metener Oy toimittaa kuivien biomassojen käsittelyyn panostoimisia reaktoreita, joihin soveltuu käytettäväksi olkimateriaalit, kuivalanta, peltokasvit, järvihiomassat sekä puuaines. Laitoksella muodostuva mädätysjäätös voidaan myös jalostaa lannoitteeksi eli ravinteiden kierrätys onnistuu myös tällä reaktorilla. Laitos ei myöskään tarvitse sekoittimia tai syöttölaitteita, kun tekniikka on valittu oikein. Panosreaktoritekniikkaa on myös kehitetty automaattiseksi niin, ettei laitoshenkilökuntaa tarvita. (Metener Oy 2021 a.) Saatavien syötteiden käsittelyyn voidaan näin ollen harkita myös panostoimista reaktoria.

Biokaasuprosessissa puhdistus ja jalostus ovat tärkeitä vaiheita ennen kuin biokaasua voidaan hyödyntää liikenneajoneuvoissa. Puhdistusprosessilla saadaan kaasusta poistettua vesihöyry ja rikki ja jalostustekniikoilla lisättyä kaasun energiatihyyttä poistamalla inerttejä kaasuja.

Puhdistusprosessin suunnitteluvaiheessa tulee ottaa huomioon raakakaasun koostumus ja laitevalmistajien vaatimukset. Biokaasua voidaan puhdistaa hajautettuna tuotanto- ja käsittelyketjussa tai se voi olla integroituna muihin järjestelmiin. Vesihöyryn ja usein myös rikkivedyn puhdistamiseen tarvitsee kuitenkin olla erilliset yksiköt. Biokaasun jalostamon tekniologioilla on vaikutusta epäpuhtauksiin, joten se on myös osa puhdistusjärjestelmää. Yksinkertaisimmillaan puhdistusjärjestelmä sisältää silikageeliadsorptioyksikön (vesihöyryn poisto), kuivauksen ja biologisen rikkivedyn pelkistämisen. Biokaasun tuotantoa selvitetään Keravan Energiolla käytettäväksi liikennepolttoaineena ja siksi tässä työssä keskitytään

enemmän jalostusteknologioihin. Mahdollisen biokaasulaitoksen suunnitteluvaiheessa tulee perehtyä biokaasun puhdistusprosesseihin.

Jalostuksen kohteena on aina hiilidioksidi ja joskus myös typpi. Erilaisia jalostustekniikoita ovat kemiallinen- ja fysikaalinen absorptio, fysikaalinen adsorptio, kryojalostus, vesipesu sekä kalvojalostus. Vesipesu on yksi tärkeimmistä menetelmistä biokaasun jalostuksessa. Vesipesun avulla voidaan poistaa useita epäpuhtauksia ja se toimii tehokkaana rikin poistajana. Jalostusteknologioita valitessa metaanivuotojen alhaisuus todetaan tärkeimmäksi valintaperusteeksi. Jalostusprosessissa metaanivuodot voivat olla merkittäviä, mutta metaania voidaan kierrättää uudelleen jalostusyksikköön ja tarvittaessa hävittää jälkikäsitelystä. Jalostuksella saadaan nostettua biokaasun metaanipitoisuus 95–99 %:iin, kun raakabiokaasun metaanipitoisuus on vain noin 50–70 %. Vähimmäisvaatimus liikenteessä käytettävän jalostetun biokaasun metaanipitoisuudelle on 95 %.

Mahdolliselle biokaasulaitokselle jalostustekniikoista voisi miettiä vesipesua tai PSA-tekniikkaan perustuvaa fysikaalista adsorptiota. Vesipesu (fysikaalinen absorptio) sopii kaikenkokoisiin laitokseen, prosessi on yksinkertainen ja se on kohtuullisen edullinen tekniikka, koska ei tarvitse käyttää kemikaaleja. Fysikaalisessa adsorptiossa (PSA-menetelmä) käytetään adsorbenttia (usein aktiivihili) kaasumolekyylien (metaani, hiilidioksidi) erottamiseen toisistaan. PSA-tekniikka on lisännyt suosiotaan biokaasun jalostuksessa ja on nykyään usein käytetty jalostusteknologia (Biowoima 2021).

8.3 Saatavien biomassojen metaanintuottopotentiaali

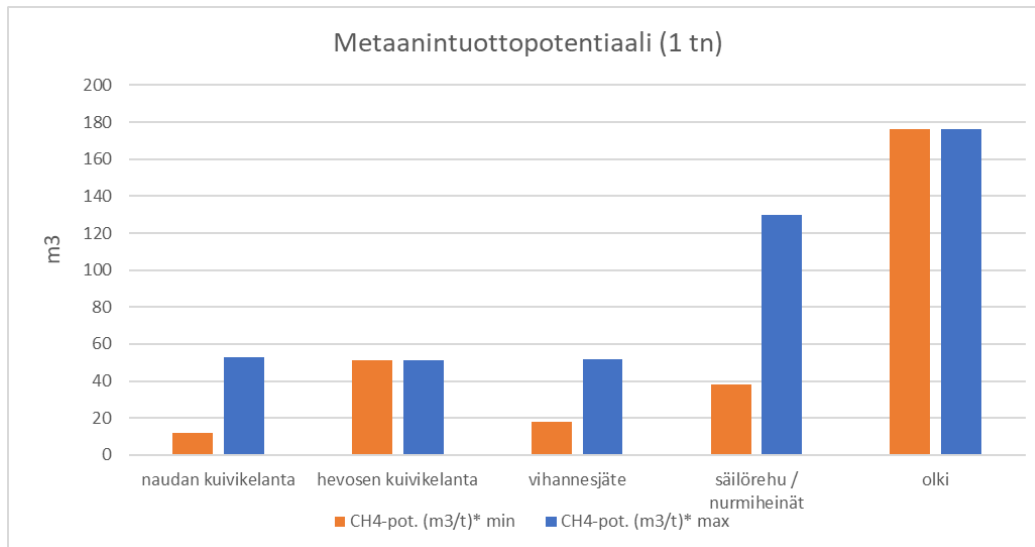
Saatavien biomassojen metaanintuottopotentiaali on laskettu taulukon 13 tietojen perusteella, jossa ilmoitetaan biomassojen orgaanisen aineen sekä tuoretonnin metaanintuottopotentiaalien vaihteluvälit (min ja max arvot). Metaanintuottopotentiaalın tarkastelussa on käytetty lähteistä saatavia teoreettisia minimi ja maksimi arvoja. Metaanintuottopotentiaalın selvittämiseen käytetään vaihteluväliä, koska työssä ei ole käytettävissä yksityiskohtaisia tietoja biomassojen ominaisuuksista.

Syöte	CH ₄ -pot. (m ³ /tVS)*		CH ₄ -pot. (m ³ /t)**	
	min	max	min	max
naudan kuivikelanta	100	250	12	53
hevosen kuivikelanta	200	200	51	51
vihannesjäte	180	514	18	52
säilörehu / nurmiheinät	213	360	38	130
olki	230	230	176	176
olki ja säilörehu keskiarvo	221,5	295	107	153

*CH₄-pot. (m³/tVS) = orgaanisen aineen metaanintuottopotentiaali
 **CH₄-pot. (m³/t) = tuoretonnin metaanintuottopotentiaali

Taulukko 13. Saatavien biomassojen syötekohtaiset metaanintuottopotentiaalit / tonni raaka-ainetta (Mukaiutu: Riihimäki ja muut 2014, 8)

Lähdemateriaaleissa ei ole ilmoitettu hevosen kuivikelannalle erilaisia metaanintuottopotentiaaleja, joten sen ei oleteta todellisuudessa vaihtelevan. Taulukossa 13 on myös ilmoitettu oljen ja säilörehu / nurmiheinän keskiarvo, jota on käytetty kyselytutkimuksessa ilmoitetun olki / nurmi biomassan metaanintuottopotentiaalilaskemiseen. Kuviossa 12 on havainnollistettu taulukon 13 tietoja. Kuvioista nähdään miten eri biomassojen tuoretonnin metaanintuottopotentiaalit eroavat toisistaan eli paljonko on yhden biomassatonnin metaanintuottopotentiaali eri raaka-aineilla.



Kuvio 12. Erilaisten biomassojen metaanintuottopotentiaali / tuoretonni (Mukailtu: Riihimäki ja muut 2014, 8)

Erilaiset biomassat muodostavat eri määriä metaania riippuen niiden kuiva-ainepitoisuudesta eli orgaanisen aineen määrästä ja kosteudesta. Jos kuiva-ainetta on biomassoissa paljon, saadaan suhteessa enemmän biometaanin kuin kosteilla biomassoilla, koska kuiva-aineessa on suhteessa enemmän orgaanista materiaalia kuin kosteissa biomassoissa (lietäiset biomassat). Esimerkiksi kuvioista 12 nähdään, että nurmen ja oljen tuoretonnilla on suurempi metaanintuottopotentiaali kuin samalla määrällä lehmän tai hevosen lantaa.

Kuiva-ainepitoisuuden määrittämisessä käytettiin apuna biokaasulaskuria, jonka avulla arvioitiin olevan mahdollista määrittää teoreettinen kuiva-ainepitoisuus. Biokaasulaskurilla laskettuna saatava biomassa voisi sisältää kuiva-ainetta teoreettisesti noin 530 tn/a, jolloin kuiva-ainepitoisuus olisi noin 34,4 % (kuva 13) (Maatalousinfo 2021). Todellisen kuiva-ainepitoisuuden määrittämiseksi tarvitsee kuitenkin tehdä jatkotutkimuksia.

Yhteensä;	
Syötteet:	1 550,00 t/a
Kuiva- ainetta:	533,50 t/a
<hr/>	
Syötteiden yhteenlaskettu kuiva-ainepitoisuus: 34,42 %	

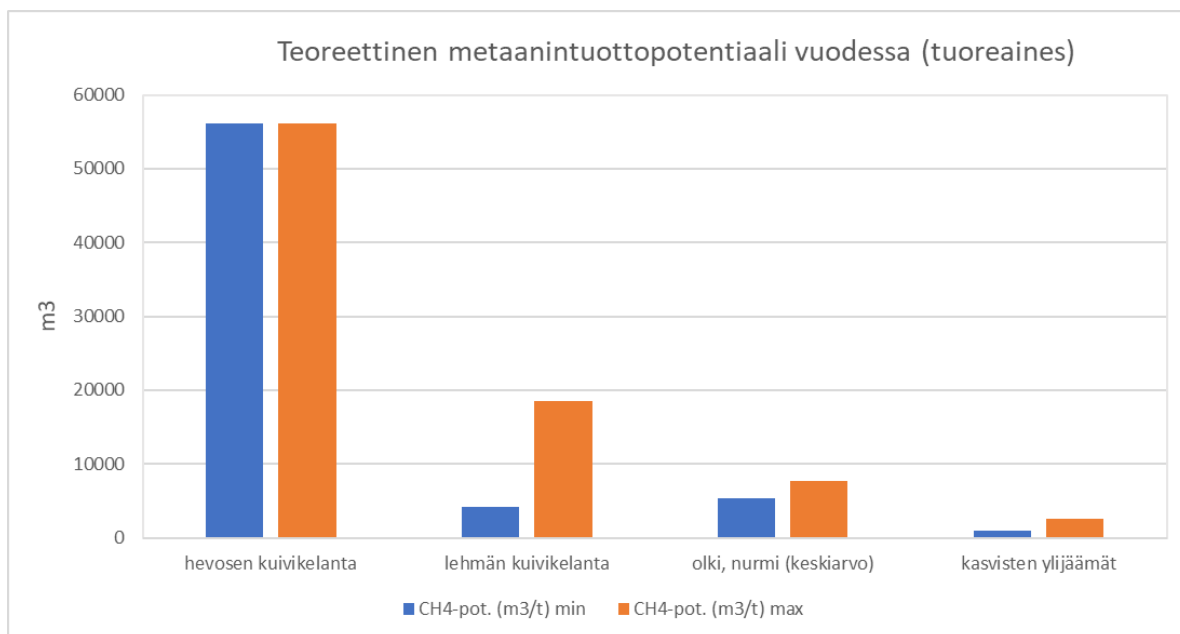
Kuva 12. Saatavien syötteiden laskennallinen kuiva-ainepitoisuus biokaasulaskurilla (Maa-talousinfo 2021)

Taulukkoon 14 on koottu biomassojen tämänhetkinen saatavuus sekä näiden yhteenlas-kettu tuoreen biomassan metaanintuottopotentiali vuodessa minimi ja maksimi arvoilla. Biomassojen keskimääräisen metaanintuottopotentialin laskentaan on käytetty edellisen taulukon 13 arvoja. Tuloksia on havainnollistettu kuviossa 13.

Syötteet	Saatavien biomassojen teorettinen metaanintuottopotentiali		
	tuoretonni / vuosi	CH ₄ -pot. (m ³ /t)*	
		min	max
hevosen kuivikelanta	1100,0	56100	56100
lehmän kuivikelanta	350,0	4200	18550
olki, nurmi (keskiarvo)	50,0	5350	7650
kasvisten ylijäämät	50,0	900	2600
Yhteensä	1550,0	66550	84900

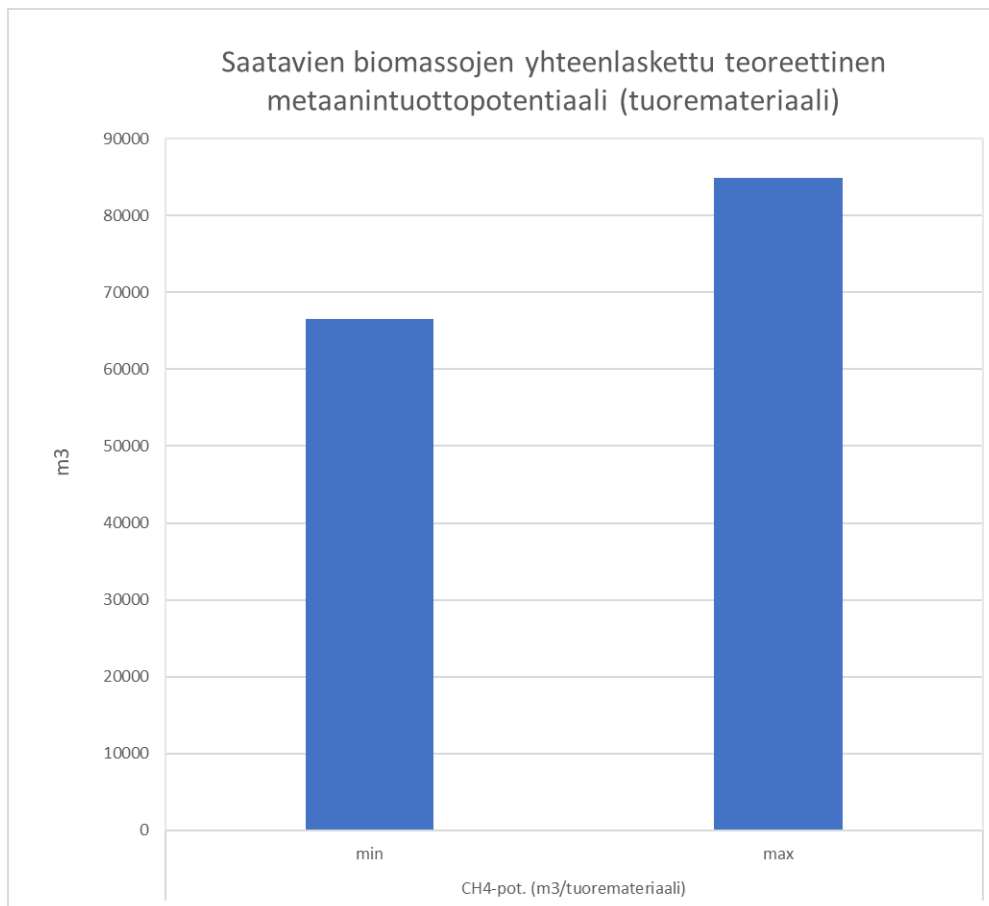
*CH₄-pot. (m³) = tuoretonnin metaanintuottopotentiali

Taulukko 14. Saatavien biomassojen yhteenlaskettu metaanintuottopotentiali vuodessa



Kuvio 13. Eri syötemateriaalien yhteenlasketut metaanintuottopotentiaalit vuodessa

Kuvioita 13 ja 12 tarkastellessa huomataan, että kyselytutkimuksen perusteella Keravan ja Sipoon alueelta saatavista biomassoista suurin potentiaali biokaasun tuotantoon tällä hetkellä olisi hevosen kuivikelannalla, vaikka yhdellä tonnilla kasvi- /peltobiomassaa on suurempi metaanintuottopotentiaali kuin esimerkiksi yhdellä tonnilla hevosenlantaa. Alueelta saatavat biomassat sisältävät kuitenkin paljon hevosen kuivikelantaa, joten sen osuus tuotetussa biometaanissa olisi suurin. Tällä hetkellä potentiaalisten biokaasun tuotantoon soveltuvien biomassojen yhteenlaskettu metaanintuottopotentiaali vuodessa voisi teoreettisesti olla noin 66 500–85 000 m³ välillä (kuvio 14) eli keskimäärin 75 800 m³.



Kuvio 14. Saatavien biomassojen yhteenlaskettu metaanintuottopotentiali vuodessa

Tuloksena saadusta metaanintuottopotentialista voidaan laskea biokaasun sisältämän metaanin energiasisältö, kun tiedetään, että yksi kuutio metaania sisältää energiaa 10 kWh. Tällöin mahdollinen biokaasulaitos voisi tuottaa energiaa välillä 665–850 MWh vuodessa, keskimäärin 760 MWh. Jos laitoksen tuottama energia käytetään kokonaisuudessaan liikennepolttoaineena, täytyy laitoksen oman toiminnan tarvitsema energia silloin ostaa ulkopuolelta (Marttinen, Tampio, Sinkko, Timonen, Luostarinen, Grönroos ja Manninen 2015, 21).

Tuotetun energiamäärän voidaan todeta olevan realistinen Palopuron Biokaasulaitos Oy:n tuotantotietojen perusteella. Kyseinen biokaasulaitos käsittelee suhteellisen samanlaisia biomassoja kuin tällä hetkellä Keravan ja Sipoon alueelta olisi saatavissa. Palopuron Biokaasulaitos Oy käsittelee vuodessa noin 3 500 tonnia nurmi-, hevosen- ja kananlantasyötettä. Laitoksen ilmoitetaan tuottavan vuodessa 2 500 MWh biokaasua, josta yli 70 % on biometaania eli laskennallisesti noin 1 750 MWh. (Suomen ympäristökeskus SYKE 2018.) Vertailtaessa näitä lukuja Keravan ja Sipoon alueelta tällä hetkellä saatavien biomassojen keskimääräiseen metaanintuottopotentialiin 760 MWh vuodessa noin 1 500 tonnista biomassaa (hevosen- ja lehmän kuivikelanta, nurmi, olki, vihannesjäte) on molempien suhde (MWh ja määrä) noin kaksinkertainen.

Saaduissa tuloksissa tulee kuitenkin ottaa huomioon lantojen metaanintuottopotentiaalissa, että laskuissa ei ole käytännössä voitu eritellä kuivikemateriaalien määrää tai muita biomassoja erikseen. Todellisuudessa lantojen metaanintuotto voi olla poikkeavaa teoreettisesta tuotosta, koska esimerkiksi sahanpuru kuivikemateriaaleissa ei ehdi hajota prosessissa. Tulee myös huomioida, että yritys, jolla syntyy paljon lehmän lantaa, on biomassassa mukana nurmi. Yhdellä nurmitonnilla on parempi metaanintuottopotentiaali kuin tonnilla lehmän lantaa. Tällöin saatavalla lehmän kuivikelantatonnilla voi todellisuudessa olla huomattavasti suurempi biometaanin tuotantopotentiaali, koska nurmi sisältää paljon kuiva- ja orgaanista ainesta. Myös kasvibiomassan orgaaninen aines voi todellisuudella olla hieman poikkeavaa laskennallisista arvoista. Laskennassa käytetyt maksimi ja minimi arvot antavat kuitenkin suuntaa siitä, mikä voisi olla metaanintuottopotentiaali mahdollisella biokaasulaitoksella.

Latvala (2009, 23) toteaa erilaisia metaanintuottopotentiaaleja kuin Riihimäki ja muut (2014, 8). Lisäksi monissa muissa kirjallisuusmateriaaleissa on ilmoitettu toisistaan poikkeavia metaanintuottopotentiaaleja. Tämä voidaan yhdistää aikaisemmin läpikäytyyn teoriaan orgaanisen aineksen ja kuiva-ainepitoisuuden vaikutuksesta syötemateriaalin biokaasun tuotantopotentiaaliin. Näin ollen on erittäin tärkeää määrittää esimerkiksi laboratoriotutkimuksilla raaka-aineiden koostumukset ja ominaisuudet ennen kuin voidaan tehdä päätöksiä biokaasulaitoksen rakentamisesta. Tulokset alueelta saatavista biomassojen metaanintuottopotentiaalista saattavat olla poikkeavia todellisuudessa, johtuen siitä mikä on niiden orgaanisten aineiden ja kuiva-aineiden pitoisuudet tuoreessa materiaalissa.

8.4 Teknitaloudelliset edellytykset

Tällä hetkellä saatavista biomassoista voitaisiin mahdollisesti vuodessa tuottaa biometaanina keskimäärin 750 MWh. Mahdollisen biokaasulaitoksen investointikustannukset on laskettu Palopuron Biokaasu Oy:n hankekustannusten mukaan taulukossa 16 (Helenius, Koppelmäki ja Virkkunen 2017, 9). Kyseisellä laitoksella syötteinä käytetään nurmea ja kuivikelantaa (Kalmari 2017, 13), joten sen katsottiin parhaiten vastaavan Keravan ja Sipoon alueelta saatavia biomassoja. Erona Keravan ja Sipoon alueelta lisäksi saatavat vihannes- ja olkibiomassat. Tässä työssä oletetaan, että edellä mainituista hankekustannuksista suurin osa on kulunut pelkän laitoksen investointeihin, koska Metenerin toimittaman biokaasun jalostuksessa tarvittavan paineenkorotusjärjestelmän (korkeapainekompressori) ilmoitetaan maksavan 47 000 €, kun kapasiteetti on 40 Nm³/h ja 270 bar (Metener 2021b). Oletetaan mahdollisen biokaasulaitoksen metaanintuottopotentiaaliksi 760 MWh olevan noin 65 % osuus biokaasun sisällöstä. Tällöin vuodessa biokaasua tuotettaisiin mahdollisesti noin 1 000 MWh, mikä vastaa 100 000 m³ kaasua vuodessa. Päivässä tämä tekee käsiteltävää

biokaasua noin 274 m³ ja tunnissa noin 10 m³. Näin ollen esimerkiksi paineenkorotusjärjestelmän hinta on oletettavasti halvempi.

	Palopuron Biokaasu Oy¹	Mahdollinen biokaasulaitos
Jättemäärä	noin 3 500 tn vuodessa	noin 1 500 tn vuodessa
Kustannukset	~ 150 000 €	~ 75 000 €
Mukautetut kustannukset		~ 120–130 000 €

1) Lähde: Helenius ja muut 2017, 9

Taulukko 15. Mahdollisen biokaasulaitoksen teoreettinen investointikustannus

Kaupallisia laitosinvestointeja kuivamädätystekniikalla ei juurikaan ole toteutettu Suomessa, yksittäiset tapaukset poissulkien, joten laskennalliset investointikustannukset voivat muuttua paljonkin, jos mahdollinen biokaasulaitos päätetään rakentaa alueelle (Helenius ja muut 2017, 26). Taulukon 15 tiedot Palopuron Biokaasu Oy:n kustannuksista oletetaan sisältävän suurimmalta osin vain biokaasulaitoksen hankintakustannukset.

Biokaasun tuotanto liikennekäyttöön pienen kokoluokan laitoksissa voi nostaa investointikustannukset jopa 1,5–2 kertaiseksi verrattuna pieniin laitoksiin, joilla ei tuoteta liikennebiokaasua, koska pelkän biokaasulaitoksen lisäksi tarvitaan myös puhdistuslaitteisto. Pitkällä aikavälillä hyödyt ovat kuitenkin merkittäviä. (Finess 2021.) Mahdollisen pelkän biokaasulaitoksen hankintakustannukset voivat siis todellisuudessa olla 180 000–260 000 euroa. Lisäksi muodostuu erilaisia kustannuksia tontin hankinnasta, rakennustöistä, lupa-asioista ja niin edelleen. Myös laitoksen ylläpitokustannukset tulee ottaa huomioon. Ne voivat olla noin 5 % investointihinnasta Keravan Energian toiminta-alueella. Johtopäätöksenä oletetaan kokonaiskustannusten olevan noin 400 000–500 000 €.

Työ- ja elinkeinoministeriö voi myöntää biokaasulaitoshankkeille investointitukea 25–40 %. Tuki on riippuvainen muun muassa laitoksen kokoluokasta ja teknologian uutuusarvosta (Työ- ja elinkeinoministeriö 2020, 49.) Uusi teknologia viittaa sellaisiin uusiin ratkaisuihin, joita Suomessa on vielä vähän (Business Finland 2021). Biokaasuhankkeet, jotka eivät ole maatilakohtaisia (tuki jopa 40 %), voivat saada tukea 25 % vuonna 2021, kun investointikustannukset ovat vähintään 10 000 euroa. Tapauskohtaisesti uuden teknologian käyttäminen voi korottaa tukea 5 prosenttiyksikköä. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2021.) Keravan ja Sipoon alueelle mahdollisesti toteutettava biokaasulaitos olisi toimintamalliltaan erilainen kuin esimerkiksi perinteinen maatalan yhteyteen perustettava biokaasulaitos, joita on paljon Suomessa. Keravan Energia toimisi pääasiassa operoijana ja syötteen laitokseen tulisivat

laitoksen ulkopuolelta. Energiayhtiöiden osallistuminen esimerkiksi maataloilta saatavien syötteiden käsittelyyn, Keravan Energian tapauksessa oma selvitys biokaasun tuotantoon alueelta saatavien raaka-aineiden perusteella, on vielä harvinaista Suomessa (Helenius ja muut 2017, 26). Näin ollen voisi olettaa, että Keravan Energialla olisi mahdollista saada 30 % investointitukea biokaasulaitoshankkeeseen ja esimerkiksi noin 500 000 € investointikustannukset olisivat tuen jälkeen noin 350 000 euroa.

8.5 PESTEL-analyysi

PESTEL-analyysillä kartoitetaan yrityksen toimintaympäristön muutoksia eri näkökulmista. Tarkoituksena on selvittää mahdollisuuksia ja rajoituksia, joihin omilla päätöksillä ei voida suoraan vaikuttaa. Analyysissä tarkastellaan organisaation lähtötilaa yhteiskunnassa ja markkinoilla. Toimintaympäristön tarkastelussa näkökulmina ovat poliittiset (P), ekonomiset (E), sosiaaliset (S), teknologiset (T), ekologiset (E) ja lailliset (L) tekijät. (Lempinen 2019.)

PESTEL-analyysiä tehdessä määritellään aikajänne, millä ajanjaksolla tarkastelu tehdään (esimerkiksi 15 vuotta) ja toimintaympäristön laajuus. Analyysillä pyritään tunnistamaan, kuvittelemaan tai ajattelemaan organisaation toimintaan vaikuttavia tärkeimpiä tekijöitä (muun muassa ilmiöt, tapahtumat) eri näkökulmista (PESTEL). Muuttujia voidaan käyttää apuna skenaariotyössä tai tulevaisuuden kehityksen seurannassa. (Lapin Luotsi 2019.)

Tässä opinnäytetyössä PESTEL-analyysillä tarkastellaan toimintaympäristön nykytilaa. Tulevaisuuden ennakointi ei vielä tässä vaiheessa ole aiheellista, sillä työssä vasta selvitetään mahdolliselle biokaasulaitokselle saatavia raaka-aineita ja niiden hyödynnettävyyttä biokaasun tuotantoon. Biokaasulaitostoimialaan vaikuttavia tekijöitä on koottu taulukkoon 17 (Muttikainen, Sormunen, Paavola, Haikonen ja Väisänen 2016, 27) niiltä osin, millä tekijöillä on vaikutusta mahdollisen biokaasulaitoksen toimintaan.

Osa-alue	Eri tekijöiden vaikutus biokaasutoimialalla; (+) edistävästi ja (-) hidastavasti
Poliittiset tekijät	<ul style="list-style-type: none"> + Suomi on sitoutunut EU:n päästövähennystavoitteisiin + Hallitusohjelman tavoitteet energian kotimaisuudesta ja uusiutuvat energiat; biokaasu kärkihankkeissa mukana + Biokaasulla ei valmisteveroa eikä polttoaineveroa liikennekäytössä - Poliittisen toimintaympäristön muutoksia ei voida ennakoita
Ekonomiset (taloudelliset) tekijät	<ul style="list-style-type: none"> + Erilaiset tuet, muun muassa investointituki + Biokaasun tuotanto integroituu taloudellisesti hyvin jätehuollon murrokseen sekä metsä- ja elintarviketeollisuuden prosesseihin + Biokaasulaitoksilla on positiivinen vaikutus kansallisissa ja alueellisissa talousaktiiviteeteissä sekä työllisyyskehityksessä + Pitkän aikavälin vaikutukset: fossiilisten polttoaineiden hinnat nousevat – biokaasun kilpailukyvyyn parantuminen - Talous- ja vientinäkökulmasta kehittämätön toimiala: joitakin vahvoja yrityksiä, useita pk-yrityksiä, kotimaassa toiminta vähäistä - Biokaasulaitosten kannattavuus on heikko ilman tukia - Kotimaassa kustannustehokkaiden laitosteknologioiden saatavuus on heikko - Kierrätysravinteiden markkinat eivät ole kehittyneet – ravinteista muodostuu tois- taiseksi vain kuluerä laitoksille
Sosiaaliset (yhteiskunnalliset) tekijät	<ul style="list-style-type: none"> + Ympäristötietoisuus lisääntyy: lähellä tuotetun energian arvostus, biokaasun käyttöä yrityksissä pidetään myyntivalttina + Kunnalliset toimijat aktivoituvat, kun jätehuoltoa kehitetään lainsäädäntömuutosten takia
Teknologiset tekijät	<ul style="list-style-type: none"> + Kaasun tuotannon, jakelun ja käytön infra osittain tai paikoin jo olemassa + Uusien biomassamuotojen jatkuva kehittäminen (esim. levät) + Biokaasuteknologia monilta osin jo vakiintunutta + Kaasuautojen hankintakustannukset ovat bensiini- ja dieselautojen luokkaa, käyttökustannukset edullisempia - Jakeluverkosto liikenteessä käytettävän biokaasun siirtämiseen vielä suppea
Ekologiset (ympäristölliset) tekijät	<ul style="list-style-type: none"> + Liikenteessä käytettävistä biopolttoaineista biokaasulla voidaan saavuttaa suurin päästövähennelmä + Teollisten symbioosien ja resurssitehokkuuden merkitys lisääntyy – biokaasun tuotanto olennainen osa muutosta + Biokaasun tuotannossa syntyvien sivutuotteiden hyödyntäminen lannoitteena vähentää ympäristökuormitusta – ravinteiden talteenotto ja uudelleenkäyttö - Mahdolliset haju- ja muut ympäristöhaitat
Lainsäädännölliset tekijät	<ul style="list-style-type: none"> + Jätelain muutos: kaatopaikoille on kielletty sijoittaa biohajoavaa jätettä – edistää biokaasun tuotantoa + EU:n direktiivillä vaihtoehtoisten polttoaineiden infrastruktuuriin käyttöön otolla edistetään biokaasun jakelua liikenteessä - Jätteen käsittelyn ja kierrätyslannoitteiden valmistuksen ja hyödyntämisen lupakäytännöt ovat monimutkaisia

Taulukko 16. PESTEL – analyysi (Mukaiutu: Mutikainen ja muut 2016, 27)

9 Yhteenveto

Keravan ja Sipoon alueelta kyselytutkimuksen perusteella saatavia raaka-aineita biokaasun tuotantoon olisivat hevosen- ja lehmänlanta, olki- ja nurmibiomassat sekä ruoantuotannon sivutuotteena saatavat kasvibiomassat. Nämä ovat yleensä hyvin hyödynnettävissä biokaasun tuotantoprosessissa. Ennen kuin voidaan varmistua syötteiden soveltuvuudesta biokaasun tuotantoprosessiin, tulee syötemateriaalien todellinen koostumus selvittää. Tämä onnistuu esimerkiksi laboratoriossa tehtävillä tutkimuksilla, joilla saadaan selville muun muassa eri biomassojen orgaanisten aineiden pitoisuudet, ravinnepitoisuudet ja todellinen metaanintuottopotentiaali. Jos laboratoriotutkimuksienkin jälkeen Keravan ja Sipoon alueella on potentiaalia aloittaa biokaasulaitostoiminta, tulee jo suunnitteluvaiheessa huomioida lainsäädäntö. Lainsäädännöllä ohjataan biokaasulaitostoimintaa ennen ja jälkeen rakentamisen. Investointitukea on myös mahdollista saada biokaasulaitoshankkeen suunnitteluvaiheessa.

Vaihtoehtoja kuivien syötteiden mädättämiseen voisivat olla tulppavirtausreaktori tai panosreaktori. Se, kumpi tekniikka sopii paremmin saatavien biomassojen käsittelyyn, voidaan valita vasta sitten, kun tiedetään enemmän biomassojen ominaisuuksista. Biokaasulaitos sisältää myös kaasun puhdistus- ja jalostusyksiköt, kun biokaasua tuotetaan liikennekäyttöön. Puhdistusyksikkö voi yksinkertaisimmillaan sisältää silikageeliadsorptioyksikön (vesihöyryn poisto), kuivauksen ja rikkivedyn biologisen pelkistämisen. Mahdollisen biokaasulaitoksen jalostustekniikoiksi voisi miettiä joko vesipesua tai paineenvaihtelutekniikkaa (PSA, pressure swing adsorption). Puhdistuksella poistetaan biokaasusta epäpuhtauksia ja jalostuksella nostetaan biokaasun energiatiheyttä, kun kaasusta poistetaan lisäksi hiilidioksidi ja joskus myös typpi. Biokaasun jalostuksella saadaan kaasun metaanipitoisuus nostettua yli 95 %:iin, mikä on liikenteessä käytettävän biokaasun metaanipitoisuuden vähimmäisvaatimus.

Tutkimuksen tuloksena voidaan todeta, että Keravan ja Sipoon alueen yrityksillä muodostuu biomassoja, joita voitaisiin hyödyntää biokaasun tuotannossa. Yhteensä biomassoja muodostuu vuodessa noin 1 500 tonnia. Teoreettisesti tämä määrä kyseisiä biomassoja voisi vuodessa tuottaa biometania keskimäärin noin 760 MWh. Verratessa biomassojen metaanintuottopotentiaalia samantyyppisiä biomassoja käsittelevän biokaasulaitoksen tuotantoon todettiin, että saadut tulokset ovat realistisia. Pienen kokoluokan biokaasulaitos voisi olla mahdollinen rakentaa, jos kustannukset pysyvät kohtuullisina ja saadaan investointitukea.

Lisäksi alueen yrittäjät olivat kiinnostuneita biokaasuyhteistyöstä Keravan Energian kanssa, kun toiminta on yrityksiä hyödyttävää. Tutkimuksia tulisivatkin jatkaa biokaasulaitoksen toteuttamispotentiaalin selvittämisestä alueelle, koska biokaasuyhteistyöstä kiinnostuneita

yrittäjiä voi olla enemmänkin ja tämä tutkimus ei suoraan sovellu käytettäväksi apuna biokaasulaitosinvestointia mietittäessä. Muita tarvittavia jatkotutkimuksia ovat muun muassa biomassojen koostumuksen selvittäminen, laitoksen sijainti, logistiikka ja kannattavuuslaskelmat. Biokaasun puhdistuksen todettiin olevan laajempaa kuin jalostusprosessien, joten siihen tulee tutustua myös tarkemmin. Mahdolliset muut tutkimukset voivat liittyä mädätysjäännöksen käsittelyyn ja lopputuotteiden hyödyntämismahdollisuuksiin, näiden vaikutukseen biokaasulaitostekniikan valinnassa ja investointikustannuksiin sekä biokaasulaitoksen tuottaman lämmön hyödyntämiseen laitoksen prosesseihin. Tulevaisuudessa voi olla aiheellista tutkia myös esimerkiksi biokaasusta poistettavan hiilidioksidin hyödyntämismahdollisuuksia, jos biokaasulaitokseen päätetään investoida.

Lähteet

Bioenergianeuvoja 2021a. Biokaasu. Energiahuoltovarmuus. [Viitattu 21.4.2021].

Saatavissa: <http://www.bioenergianeuvoja.fi/biopolttoaineet/biokaasu/>

Bioenergianeuvoja 2021b. Hevosenslanta. Tehoenergiaa. [Viitattu 21.4.2021]. Saatavissa:

<http://www.bioenergianeuvoja.fi/biopolttoaineet/hevosenslanta/>

Bioenergianeuvoja 2021c. Peltobiomassat. [Viitattu 21.4.2021]. Saatavissa:

<http://www.bioenergianeuvoja.fi/biopolttoaineet/peltobiomassat/>

Bioenergianeuvoja 2021d. Ruokohelpi. Käyttö rehuksi tai energianlähteenä. [Viitattu 3.3., 5.4.2021]. Saatavissa:

<http://www.bioenergianeuvoja.fi/biopolttoaineet/peltobiomassat/ruokohelpi/>

Bioste 2021. Biokaasu. [Viitattu 26.4.2021]. Saatavissa:

<https://bioste.fi/bioenergia/biokaasu/>

Biovoima 2021a. Kuivamädätyksen ja märkämädätyksen edut yhdistelmälaitoksella.

[Viitattu 28.4.2021]. Saatavissa: <https://biovoima.com/ratkaisut/biokaasulaitos>

Biovoima 2021b. Kuivamädätys eli tulppavirtausreaktori perinteisen märkäprosessin

haastajana. [viitattu 28.4.2021]. Saatavissa: <https://biovoima.com/ratkaisut/biokaasulaitos>

Biowoima 2021. Biokaasulaitos – tuottavaa orgaanisten jätteiden käsittelyä. [Viitattu

28.4.2021]. Saatavissa: <https://www.biowoima.com/fi/biokaasulaitos>

Business Finland 2021. Energiatuki. [Viitattu 5. ja 10.5.2021]. Saatavissa:

<https://www.businessfinland.fi/suomalaisille-asiakkaille/palvelut/rahoitus/energiatuki>

Ecoprotech 2021. Kuivamädätys. [Viitattu 28.4.2021]. Saatavissa:

<https://ecoprotech.fi/ratkaisut/biokaasun-tuotanto/kuivamadatys/>

Eduskunta 2017. Hallituksen esitys HE 184/2017 vp. Hallituksen esitys eduskunnalle

laeiksi eräiden polttoaineiden elinkaarenaikaisten kasvihuonekaasupäästöjen

vähentämisestä ja biopolttoaineista ja bionesteistä annetun lain 2 §:n muuttamisesta.

[Viitattu 29.4.2021]. Saatavissa:

https://www.eduskunta.fi/FI/vaski/HallituksenEsitys/Sivut/HE_184+2017.aspx

Energiavirasto 2021. Preemiojärjestelmä. [Viitattu 10.5.2021]. Saatavissa:

<https://energiavirasto.fi/preemiojarjestelma>

(EY) N:o 1069/2009. Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EY) N:o 1069/2009. [Viitattu 29.4.2021]. Saatavissa: <https://www.ruokavirasto.fi/yritykset/elainala/elaimista-saatavat-sivutuotteet/sivutuotelainsaadanto/>

Finess 2021. Biokaasu. Biokaasunpuhdistus parantaa biokaasuntuotannon kannattavuutta. [Viitattu 5.5.2021]. Saatavissa: <https://finess.fi/toimialat/biokaasu/>

Gasum 2020. Bio- ja maakaasulla kohti kestäväää logistiikkaa. Biokaasu on uusiutuvaa, maakaasu fossiilisista polttoaineista vähäpäästöisin. [Viitattu 16.3.2021]. Saatavissa: <https://www.gasum.com/ajassa/puhdas-liikenne/2020/bio--ja-maakaasulla-kohti-kestavaa-logistiikkaa/>

Gasum 2007, 31. Maakaasun liikennekäyttö. Interaction työpaja 12.6.2007. [Viitattu 29.4.2021]. Saatavissa: <https://docplayer.fi/5221109-Maakaasun-liikennekaytto-interaction-tyopaja-12-06-2007-esimateriaali-gasum-oy-jussi-vainikka-myyntipaallikko-jussi-vainikka-gasum.html>

Gasum 2019. Yhä useampi tankkaa biokaasua. [Viitattu 16.3.2021]. Saatavissa: <https://www.gasum.com/ajassa/puhdas-liikenne/2019/yha-useampi-tankkaa-biokaasua/>

Helenius, J., Koppelmäki, K. ja Virkkunen, E. (toim.) 2017, 9. Agroekologinen symbioosi ravinne- ja energiaomavaraisessa ruoantuotannossa. [Viitattu 5.5.2021]. Saatavissa: <https://ym.fi/julkaisu?pubid=URN:ISBN:978-952-11-4716-6>

Hevostietokeskus 2018. Hevosenlannan hyödyntämismahdollisuuksia. [Viitattu 28.4.2021]. Saatavissa: <https://hevostietokeskus.fi/i/talliymparisto/lantahuolto/hevosenlannan-hyodyntamismahdollisuuksista>

Jaakkola, U. 2015, 56–57. Biokaasuteknologia. Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen. [Viitattu 24.4.2021]. Saatavissa: <https://www.theseus.fi/handle/10024/104180>

Kalmari, J. 2017, 13. Biobisnestä Pirkanmaalle, Lempäälä 23.3.2017. [Viitattu 5.5.2021]. Saatavissa: <http://biobisnesta.fi/biokaasun-teemapaiva-lempaala/>

Kari, M. ja Häkkinen, P. 2021, 1–2, 4, 11. Maatalouden biomassat biokaasulaitoksessa. Opas biomassojen ominaisuuksista syötteenä ja lannoitteena. [Viitattu 3.3., 2.4. ja 5.4.2021]. Saatavissa: <https://www.proagria.fi/hankkeet/keskitetyn-biojalostamon-toimintamalli-raaka-aineet-ja-madatejaannoksen-kayttokohteet-5856>

Kymäläinen, M. 2015, 21–22, 32, 44, 59–62, 67. Biokaasuteknologia. Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen. [Viitattu 8.2., 25.2., 27.2., 1.3., 3.3. ja 5.4.] Saatavissa: <https://www.theseus.fi/handle/10024/104180>

Laki eläimistä saatavista sivutuotteista 517/2015. Laki eläimistä saatavista sivutuotteista. [Viitattu 29.4.2021]. Saatavissa: <https://www.ruokavirasto.fi/yritykset/elainala/elaimista-saatavat-sivutuotteet/sivutuotelainsaadanto/>

Lampinen, A. 2015, 124–128, 131–132, 134–141, 143–150, 158, 160. Biokaasuteknologia. Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen. [Viitattu 4.3., 16.3., 17.3., 20.–21.3.2021]. Saatavissa: <https://www.theseus.fi/handle/10024/104180>

Lapin Luotsi 2019. Ennakoinnin työkalupakki. Ennakointitieto. PESTE-analyysi toimintaympäristön muutosten hahmottamiseen. [Viitattu 4.5.2021]. Saatavissa: <https://lapinluotsi.fi/lapin-ennakointityo/ennakoinnin-koulutusmateriaali/tyokalupakki/>

Latvala, M. 2009, 23, 33. Paras käytettävissä oleva tekniikka (BAT). Biokaasun tuotanto suomalaisessa toimintaympäristössä. [Viitattu 3.5.2021]. Saatavissa: <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/37998>

Lehtomäki, A., Paavola, T., Luostarinen, S. ja Rintala, J. 2007, 30, 32–33. Biokaasusta energiaa maatalouteen – raaka-aineet, teknologiat ja lopputuotteet. [Viitattu 28.4.2021]. Saatavissa: <https://jyx.jyu.fi/handle/123456789/47694>

Lempinen, J. 2019. Laadukas peste-analyysi. [Viitattu 4.5.2021]. Saatavissa: <https://esseepankki.proakatemia.fi/laadukas-pesto-analyysi/>

Li, X. 2021. Biogas production from crop straw through anaerobic digestion – key technologies and demonstrations in China. [Viitattu 30.4.2021]. Saatavissa: https://energypedia.info/wiki/Biogas_Production_from_Crop_Straw_through_Anaerobic_Digestion

Luostarinen, S. 2015, 33, 36–38, 82–84, 86–89. Biokaasuteknologia. Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen. [Viitattu 10.2., 1.3., 29.–30.3., 1.4. ja 5.4.]. Saatavissa: <https://www.theseus.fi/handle/10024/104180>

Maatalousinfo 2021. Biokaasulaskuri. [Viitattu 3.5.2021]. Saatavissa: <https://maatalousinfo.luke.fi/fi/laskurit/biogas>

Marttinen, S., Tampio, E., Sinkko, T., Timonen, K., Luostarinen, S., Grönroos, J. ja Manninen, K. 2015, s.21. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 12/2015. Biokaasulaitokset – syötteistä lopputuotteisiin. Energia, ravinteet ja ympäristövaikutukset.

[Viitattu 4.5.2021]. Saatavissa:

https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjZxbaBsQ_wAhXrkIsKHammAboQFjAEegQIEhAD&url=https%3A%2F%2Fcore.ac.uk%2Fdownload%2Fpdf%2F52253264.pdf&usg=AOvVaw2e5ZDBUpvA9CSSyQZysbNb

Metener 2021a. Biokaasulaitokset. Kuivareaktori. [Viitattu 5.5.2021]. Saatavissa: <http://www.metener.fi/biokaasulaitokset/>

Metener 2021b. Biometaanin paineistus. [Viitattu 5.5.2021]. Saatavissa: <http://www.metener.fi/biokaasun-paineistus/>

Mikkola, H. 2012, 17, 19–21. Peltobioenergian tuotanto Suomessa. Potentiaali, energiasuhteet ja nettoenergia. Väitöskirja. [Viitattu 2.–3.3.2021]. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/bioenergia/energiaa_pelloilta

Motiva 2013, 10, 25. Biokaasun tuotanto maatilalla. [Viitattu 26.4.2021]. Saatavissa: https://www.motiva.fi/files/6958/Biokaasun_tuotanto_maatilalla.pdf

Motiva 2020a. Energiatuet uusiutuvalle energialle. [Viitattu 10.5.2021]. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/uusiutuva_energia_suomessa/uusiutuva_n_energian_tuet/investointituet_uusiutuvalle_energialle

Motiva 2020b. Kaasuautot. Kaasuautojen tekniikka. [Viitattu 16.3.2021]. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/nain_liikut_viisaasti/valitse_auto_viisaasti/ajoneuvotekniikka/moottoritekniikka/kaasuautot

Motiva 2020c. Maatalouden investointituet. [Viitattu 10.5.2021]. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/uusiutuva_energia_suomessa/uusiutuva_n_energian_tuet/maatalouden_investointituet

Motiva 2020d. Syöttötariffi. [Viitattu 10.5.2021]. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/uusiutuva_energia_suomessa/uusiutuva_n_energian_tuet/syottotariffi

Motiva 2020e. Uusiutuvan energian tuet. [Viitattu 10.5.2021]. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/uusiutuva_energia_suomessa/uusiutuva_n_energian_tuet

Mutikainen, M., Sormunen, K., Paavola, H., Haikonen, T. ja Väisänen, M. 2016, 27. Biokaasusta kasvua. Biokaasuliiketoiminnan ekosysteemien mahdollisuudet. [Viitattu 4.5.2021]. Saatavissa: <https://www.sitra.fi/julkaisut/biokaasusta-kasvua/>

- Paavola, T. 2015, 86, 94–95. Biokaasuteknologia. Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen. [Viitattu 29.–30.3. ja 1.–2.4.2021]. Saatavissa: <https://www.theseus.fi/handle/10024/104180>
- Paavola, T. 2006. Maatilan biokaasulaitokset. Teoksessa Luoma, H., Peltonen, S., Helin, J. ja Teräväinen, H. (toim.) Maatilyrityksen bioenergian tuotanto. Keuruu: Kirjapaino Otava Oy, 68.
- Pahkala, K. 2006. Maatilan biokaasulaitokset. Teoksessa Luoma, H., Peltonen, S., Helin, J. ja Teräväinen, H. (toim.) Maatilyrityksen bioenergian tuotanto. Keuruu: Kirjapaino Otava Oy, 38.
- Pyykkönen, V. 2015. Yleistä biokaasusta, Luke Maaningan biokaasulaitos. Syötteiden metaanintuotto Maaningan biokaasulaitoksessa. [Viitattu 30.3. ja 21.4.2021]. Saatavissa: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwji5s_Rs4_wAhVhhosKHUcWA4YQFjAAegQIAhAD&url=https%3A%2F%2Fravinnerenki.savonia.fi%2Fimages%2FRenki_tuparit_Luke_biokaasu.pdf&usg=AOvVaw31NvZdENlnVhCPDviGcA2m
- Riihimäki, M., Mahal, K., Suoniemi, J., Nurmio, J., Sirkiä, S., Marttinen, S., Pyykkönen, V., Hurskainen, L., Alm, M., Seppänen, R., Lappi, M., Ek, F. ja Järvenpää, M. 2014., 8. Biokaasulaskuri.fi. Biokaasulaskurin käyttöohje. Käytännön ohjeita biokaasulaitosinvestointia harkitsevalle. Syötteet. [Viitattu 23.4.2021]. Saatavissa: <https://www.ukipolis.fi/58>
- Saalasti, M. 2015, 181–182. Biokaasuteknologia. Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen. [Viitattu 1.4.2021]. Saatavissa: <https://www.theseus.fi/handle/10024/104180>
- Salimäki, J. 2015, 88. Biokaasuteknologia. Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen. [Viitattu 1.4.2021]. Saatavissa: <https://www.theseus.fi/handle/10024/104180>
- Seppälä, T. 2017. Energiaa biokaasusta. [Viitattu 21.4.2021]. Saatavissa: <http://ravinnejaenergia.fi/fi/energiaa-biokaasusta/>
- Seppälä, A. ja Luostarinen, S. 2014, 10. Nurmesta biokaasua liikennepolttoaineeksi. Bionurmi-hankkeen loppuraportti. Nurmirehu on tasainen syöte biokaasuprosessiin. [Viitattu 21.4.2021]. Saatavissa: <https://jukuri.luke.fi/handle/10024/484391>
- Suomen Biokierto ja Biokaasu ry 2021. Biokaasu. [Viitattu 8.2.2021]. Saatavissa: <https://biokierto.fi/biokaasu/>

Suomen kaasuyhdistys 2021. Biokaasun turvallisuusohje. Biokaasun, biometaanin ja nestemäisen biometaanin (LBG) tuotantoon ja jatkokäsittelyyn liittyvät kaasuturvallisuusasiat. [Viitattu 11.3.2021]. Saatavissa: <https://www.kaasuyhdistys.fi/julkaisut/>

Suomen ympäristökeskus SYKE 2018. Luomubiokaasua tankkiin energia- ja ravinneomavaraisesta Palopuron symbioosista. [Viitattu 5.5.2021]. Saatavissa: <https://www.energialoikka.fi/palopuron-agroekologinen-symbioosi/>

Tukes 2021a. Biokaasu. [Viitattu 22.4.2021]. Saatavissa: <https://tukes.fi/teollisuus/maakaasu-ja-biokaasu/biokaasu>

Tukes 2021b. Lainsäädäntö. [Viitattu 28.4.2021]. Saatavissa: <https://tukes.edilex.fi/fi/lainsaadanto/20050390>

Tukes 2017. Muistio. Maakaasu- ja biokaasukohteiden valvonta. Luvat ja valvova viranomainen. [Viitattu 28.4.2021]. Saatavissa: <https://tukes.fi/teollisuus/maakaasu-ja-biokaasu/biokaasu>

Työterveyslaitos 2016. OVA-ohja: Metaani – tiivistelmä. [Viitattu 4.5.2021]. Saatavissa: <https://www.ttl.fi/ova/tmetaani.html>

Työ- ja elinkeinoministeriö 2020, 49. Biokaasuohjelmaa valmisteleavan työryhmän loppuraportti. [Viitattu 5.5.2021]. Saatavissa: <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/162032>

Työ- ja elinkeinoministeriö 2021. Energia. Energia- ja investointituet. Tuettavat hankkeet ja tuen enimmäismäärät. Tyypilliset hankkeet ja tuet vuonna 2021. [Viitattu 5.5.2021]. Saatavissa: <https://tem.fi/tuettavat-hankkeet>

Virtanen, J. 2017. Perusteita karjanlannasta ja sen käytöstä. [Viitattu 1.3.2021]. Saatavissa: <https://docplayer.fi/52235998-Perusteita-karjanlannasta-ja-sen-kaytosta.html>

VNa 551/2009. Valtioneuvoston asetus maakaasun käsittelyn turvallisuudesta. [Viitattu 28.4.2021]. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2009/20090551>

Ympäristönsuojelulaki 2014/527. Ympäristönsuojelulaki. Yleiset säännökset, 1§. [Viitattu 29.4.2021]. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2014/20140527?search%5Btype%5D=pika&search%5Bpika%5D=ymp%C3%A4rist%C3%B6lupa>

Liite 1. Kyselytutkimus

1. Millaisia hyödyntämättömiä / vajaasti hyödynnettyjä biomassoja toiminnessasi syntyy? Esimerkiksi olkea, nurmea, puutarhajätettä, ruoantuotannon sivuvirtoja yms.	2. Jos tilalle syntyy lantamateriaalia, millaista se on? Esimerkiksi kuivikelanta, kuivikepohjalanta, lietelanta tms.	3. Millainen on biomassojen koostumus?		
		kuiva	märkä	sekoitus
	Kuivikelanta			sekoitus
Olkea, Nurmea,				sekoitus
Olkea, turvetta, heinää	Kuivikelanta	kuiva		
Kasvisten ylijäämäosia tuotannon ja kaupakunnostuksen osalta				sekoitus
Olkea eläinten kuiviketiloista Lehmän lantaa ja nurmea.	Kuivikelantaa (turve/puupelletti/puru) Kuivikelanta.			sekoitus
	Hevosten Kuivikelantaa. Sahanpuru kuivikkeena	kuiva		
Hevosen kuivikelantaa, heinää	Kuivikelantaa			

4. Kuinka paljon biomassoja / lantaa syntyy? (tonneina tai kiloina)	5. Onko hyödyntämätön biomassa / lanta riippuvainen vuodenaajoista, vai syntyykö biomassaa / lantaa läpi vuoden tasaiseen tahtiin? Arvioi määrän vaihtelua vuodenaikojen mukaan.	6. Vaihtelee koostumus / lannan koostumus vuodenaikojen mukaan?
Useampi tonni	Kesällä vähemmän	Aavistuksen
50tn	Kesä-syyskaudella ainoastaan	ei
n. 70kk	Melko tasaisesti, heinäkuussa hieman vähemmän.	Ei
50 tonnia	Biomassa on melko tasaista. Jonkin verran suurempaa kesäke	Ei.
Vaihtelee mutta n 70 000 kg/v 200-500 tonnia.	Tasaiseen tahtiin mutta painottuen kuitenkin syys-kesäkuulle Tasainen tahti ympäri vuoden.	Vaihtelee, kesä-syyskuussa kun hepat laitimella 24/7 niin kuivikkeen osuus lannan määrässä huomattavasti pienempi. Ei.
Kuukaudessa n 10-15 tonnia	Enemmän loka-huhtikuu	Saattaa olla märempi syksyllä - talvella ilman kosteuden mukaan
50t	Laidunaikana ei synny	Ei, katettu lantala

7. Onko yritykselläsi hyödyntämätöntä peltoalaa, jolla voisi kasvaa energiakasveja biokaasun tuotantoon?	8. Mihin tällä hetkellä syntyvä biojäte sijoitetaan?	9. Millaisia kustannuksia biojätteen sijoittamisesta syntyy vuositasona?
Ei		
On, n. 5-10ha	Oljet jää peltoon puinnin aikana, Ylimääräiset Nurmet jää pellolle korjaamatta.	0-2000€
Ei	Osittain viljelyyn. osittain mullan tuotantoon.	n. 600,-/kk
Ei.	Rehuksi ja kerättyinä jätteeksi.	
Ei	Omalle pellolle, naaputitilan viljelijälle ja yksityishenkil	Tällä hetkellä ei juuri mitään.
Juu.	Levitetään pellolle.	
	Lantalaan	2500 -3000 €
Ei	Vastaanottajalle	500e

10. Millaiset taloudelliset tekijät ovat ehkä olleet esteenä oman bioenergiatoiminnan aloittamiselle?	11. Oletko kiinnostunut lähtemään mukaan tuottamaan sivuvirtaraaka-ainetta mahdolliselle biokaasulaitokselle?	12. Mitä hyötyä toivoisit yhteistyön Keravan Energian kanssa tuovan?
	Juu	Vaikka sähkölaskussa hyvitys
Liian pienet määrät	Mahdollisesti, Olki- ja muut paalit, Mikäli maksettava korvaus on riittävä työmäärään ja maan ravinnehäviön korvaamiseksi.	
Laitoksen pitäisi olla niin suuri, jotta se olisi riittävän kannattava.	Kyllä	Taloudellista ja ekologista
Toimintamme koko on maltillista, joten oma bioenergiatoiminta ei ole ollut järkevää.	Mahdollisesti.	Säästöjä jätekustannuksissa.
Ei tietoa miten sitä voisi itse hyödyntää	Ehkä.	Lannan ja kuivikeoljen noutoa säännöllisesti sovitusti tai välivarastointimahdollisuutta. Esim. Keravan Energian lantalava joka käydään hakemassa/vaihtamassa säännöllisesti). Kuivikekuljetus eli uudet kuivikkeet tilalle samalla kun lanta haetaan.
Kustannukset.	Juu.	Hyvä yhteistyö.
Raha	Kyllä	Pääsisin ekologisesti eroon kuivikelannasta
	Kyllä	Lannan hävitys kustannustehokkaasti. Jos hinta nousee liian korkeaksi siirtymme peltolevitykseen.