

**SAVONIA**

ammattikorkeakoulu

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO  
TEKNIKAN JA LIIKENTEEN ALA

# BIOKAASUN TUOTANTOPROSESSI, SIIHEN SOPIVAT SYÖTTEET JA LOPPUKÄYTTÖKOHTEET

TEKIJÄ: Kati Kallionsivu

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala			
Tutkinto-ohjelma Energiatekniikan tutkinto-ohjelma			
Työn tekijä(t) Kati Kallionsivu			
Työn nimi Biokaasun tuotantoprosessi, siihen sopivat syötteet ja loppukäyttökohteet			
Päiväys	16.12.2022	Sivumäärä/Liitteet	56 liitteitä 3
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Heidi Petroff Lievestuoreen Lämpö Oy			
Tiivistelmä Opinnäytetyö koostuu kahdesta osasta, joista ensimmäinen tulee julkiseksi. Ensimmäiseen osaan koottiin yleistä tietoa biokaasuntuotannosta, käytettävistä syötteistä, laitospöytäselästä ja lopputuotteiden käyttökohteista. Eniten tutkimustietoa löytyi syötteiden tuottopotentiaaleista, joista suurin merkitys on pelto- ja metsäbiomassassa niiden saatavuuden ja tasalaatuisuuden vuoksi. Teollisuudensivuvirtojen ja erilliskerättyjen biojätteiden osalta tarvittaisiin koordinoitua seurantaa ja helppoa ilmoituskanavaa. Laitospöytäselänsäätimet ovat käytännön kautta todettu toimiviksi, mutta optimointia kokoonpanoissa ja prosesseissa voisi tarkastella lisää. Lopputuotteiden osalta mädätysjäätännöksen sisältämät ravinteet voisivat korvata teollistenlannoitteiden käyttöä ja lisäksi ravinnekiertoa. Biometaanin käytettävyyttä liikennepolttoaineena osaltaan laskisi päästöjen määrää ja tukisi omavaraisuutta polttoaineiden osalta. Tiedot haettiin luotetuista eri tutkimusalojen ja yhdistysten avoimista ja luotettavista lähteistä.  Opinnäytetyön toisessa osiossa kartoitettiin toimeksiantajan biokaasulaitokselle tarvittavia syötteitä kohtuullisen etäisyyden päästä laitoksesta. Joutsassa sijaitseva biokaasulaitos vaatii mittavan peruskorjauksen ja tässä työssä huomioitiin korjaus- ja turvallistamiskohteet.  Kartoitus aloitettiin tutustumalla yrityskenttään biokaasulaitoksen lähiympäristössä. Mahdollisten syötteiden saatavuutta tiedusteltiin puhelimitse tai sähköpostilla. Samalla käytiin läpi syötteiden koostumuksia ja määriä. Lisäksi opinnäytetyössä kiinnitettiin huomiota laitoksen saneerauksen yhteydessä tehtäviin korjauksiin ja turvallistamiseen sekä prosessikaavion virheiden korjaamiseen.  Tulokseksi saatiin kohtuullisen kattava syötepotentiaali laitoksen läheisyydestä ja korjattu prosessikaavio biokaasulaitoksesta. Jatkotutkimusaiheita olisi useampia, joista tärkeimpiä ovat biokaasulaitoksien lämmöneristyksen optimointiin ja uusien eritysmateriaalien käytettävyyden tutkimus sekä haitallisten vieraskasvilajien sienten mahdollinen itävyys ja leviäminen mädätysjäätännöksen mukana.			
Avainsanat Kiertotalous, kaasupolttoaine, energiatehokkuus, lannoituskäyttö			

Field of Study Technology, Communication and Transport		
Degree Programme Degree Programme in Energy Engineering		
Author(s) Kati Kallionsivu		
Title of Thesis Biogas Production Process, Suitable Inputs and Use Applications		
Date	16 December 2022	Pages/Appendices 56 appendices 3
Client Organisation /Partners Heidi Petroff Lievestuoreen Lämpö Oy		
<p><b>Abstract</b></p> <p>This thesis consists of two parts, and the first part is public. The first part of the thesis includes general information on biogas production, used inputs, plant configurations and end product uses. The most research information was found on the yield potential of inputs. The field biomasses are easily available and homogeneous. In the case of industrial side streams and separately collected biowaste, coordinated monitoring and easy reporting channels are needed. The plant configurations have been found to work through practical experience, but optimization in configurations and processes could be further explored. For final products, the nutrients contained in the digestion residue could replace the use of industrial fertilizers and increase the nutrient cycle. The availability of biomethane as a transport fuel would contribute to reducing emissions and supporting self-sufficiency in fuels. The information was retrieved from reliable open sources of various research fields and associations. The thesis was commissioned by Lievestuoreen Lämpö Oy.</p> <p>For the second part of the thesis, list of inputs that are needed and available for the client's biogas plant at a reasonable distance from the plant was collected and made. The biogas plant is located in Joutsa and it requires a major overhaul. In the thesis repair and safety items are focused on.</p> <p>The study was started by getting to know the business field in the vicinity of the biogas plant. The availability of possible inputs was inquired by phone or email. At the same time, the compositions and quantities of the inputs were reviewed. In addition, attention was paid in the thesis to the repairs and improving safety in connection with the renovation of the plant, as well as to correcting errors in the process diagram.</p> <p>The result was a reasonably comprehensive input potential from the vicinity of the plant and a corrected process diagram of the bio-gas plant. There are several topics for further research, the most important of which might be consider the optimization of the thermal insulation of biogas plants and the usability of new secretion materials. Another important future research question could be the possible germination and the spread of invasive plants' seeds as a part of the digestate.</p>		
<p><b>Keywords</b></p> <p>Circular economy, gas fuel, energy efficiency, fertilizer use</p>		

## SISÄLTÖ

1	JOHDANTO .....	7
2	BIOKAASUN TUOTANTOPROSESSI.....	8
2.1	Biokaasuntuotannon biologia .....	8
2.1.1	Hydrolyysi .....	9
2.1.2	Asidogeneesi .....	9
2.1.3	Asetogeneesi.....	10
2.1.4	Metanogeneesi .....	10
2.2	Syötteiden tuottopotentialit.....	11
2.2.1	Maataloudesta saatavien lantojen metaanintuottopotentialit .....	11
2.2.2	Maataloudesta saatavien peltobiomassojen tuottopotentialit .....	12
2.2.3	Yhdyskuntien biojätteistä ja teollisuuden sivuvirroista saatavien syötteiden tuottopotentialit .....	12
2.3	Kestävyyssuhteet ja niiden laskentakaavat biokaasulle .....	13
2.4	Toimintaedellytykset toimivalle biokaasuprosessille ja prosessia häiritsevät tekijät.....	15
2.5	Biokaasun käyttökohteet .....	16
2.6	Prosessit, komponentit ja BAT (Best Available Technology).....	17
2.6.1	Laitoksen suunnittelu .....	17
2.6.2	Syötteiden saatavuus, esikäsittely ja varastointi.....	18
2.6.3	Prosessin hallinta, huolto ja tarkkailu sekä energiatehokkuus.....	19
2.6.4	Lopputuotteiden käsittely, varastointi ja hyödyntäminen sekä päästöt ilmaan ja veteen ..	20
3	BIOKAASUREAKTORIN MITOITUSKAAVAT .....	21
3.1	Reaktorin tilavuus ja viipymäaika .....	21
3.2	Metaanintuotto .....	22
3.3	Reaktorin lämpöenergian tarve .....	22
3.4	Wobbe-indeksin laskentakaavat .....	24
4	BIOKAASUN JALOSTUS .....	24
4.1	Vesiabsorptio-menetelmä .....	25
4.2	Amiinipesuri.....	25
4.3	PSA-tekniikka.....	26
4.4	Membraaniteknologia .....	27
5	KAASUN VARASTOINTI .....	28

6	KAASUN KÄYTTÖ LIIKENNEMOLTTTOAINEENA .....	30
6.1	Kaasutankkausasemat.....	31
6.2	Kaasutankkausasema ja kaasun tankkaaminen .....	33
6.3	Turvavyöhykkeet .....	34
7	JOUTSAN EKOKAASU OY EI JULKINEN .....	37
8	POHDINTA.....	38
	LIITE 1: YHTEYDENOTOT SYÖTTEIDEN KARTOITTAMISEKSI (VAIN TILAAJALLE).....	42
	LIITE 2: KORJATTU YLEISKAAVIO (VAIN TILAAJALLE).....	43
	LIITE 3: LUONNONVARAKESKUKSEN BIOKAASULASKURI (VAIN TILAAJALLE) (LUONNONVARAKESKUS, 2022)	44

ADR=eurooppalainen sopimus vaarallisten aineiden kansainvälisistä tiekuljetuksista

CHP= Combined Heat and Power  
yhdistetty sähkön- ja lämmön tuotanto

CBG= Compressed BioGas  
Paineistettu biokaasu

LBG= Liquefied BioGas  
Nesteytetty biokaasu

CNG= Compressed Natural Gas  
Paineistettu maakaasu

LNG= Liquefied Natural Gas  
Nesteytetty maakaasu

VFA= Volatile Fatty Acids  
Haihtuvat rasvahapot

BAT= Best Available Technology  
Paras käytettävissä oleva tekniikka

ORL= Organic Loading Rate  
Orgaaninen kuormitus

HRT= Hydraulic Retention Time  
Viipymäaika

PSA= Pressure Swing Adsorption  
Paineenvaihteluadsorptio

MEA= Monoethanolamide  
Monoetanoliamiini

DEA= Diethanolamine  
Dietanoliamiini

MDEA= Methil diethanolamine  
Metildietanoliamiini

VS= Volatile Solids  
Orgaaninen kuiva-aine

TS= Total Solids  
Kuiva-aine

Nm<sup>3</sup>= Normaalikuutiometri

CSTR= Continuously Stirred Tank Reactor  
Täyssekoitteinen reaktori

## 1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö on tehty Lievestuoreen Lämpö Oy:lle ja työn tarkoituksena on ollut kartoittaa Joutsan Ekokaasu Oy:n läheisyydessä olevia orgaanisia syötteitä sekä laitoksen perusrannusta ja komponenttien päivitystä. Työn alkuosassa käydään läpi biokaasuntuotantoa systeeminä ja jo tiedossa olevia kaasuntuotantopotentiaaleja eri orgaanisten aineiden tuottamana. Työssä on käyty läpi kaasunvarastointia ja käyttömahdollisuuksia. Työn alkuosa tulee julkiseksi ja Joutsan Ekokaasu Oy - osio jää toimeksiantajan käyttöön.

Syötteiden kartoitus on aloitettu tutustumalla Keski-Suomen alueella tehtyihin hankkeisiin, jotka käsittelevät biojätteiden määrää ja laatua. Hankkeiden toteuttajiin olen ollut yhteydessä puhelimitse. Lisäksi kartoitin Joutsan seudun yrityskenttää ja heihin olen ollut yhteydessä puhelimitse ja sähköpostilla. Yhteydenotoissa olen kysellyt jätteiden määrää, laatua ja nykyistä jätehuoltoa. Perusrannuksen osalta olen tutustunut biokaasulaitoksen ympäristölupahakemukseen ja myöhempisiin huomautuksiin, käymällä paikan päällä vierailulla ja olemalla yhteydessä toimeksiantajaan ja laitostoimittajaan.

Lisäksi olen osallistunut webinaareihin, jotka ovat käsitelleet biokaasua tai biokaasualan kehitysnäkymiä eripuolella Suomea.

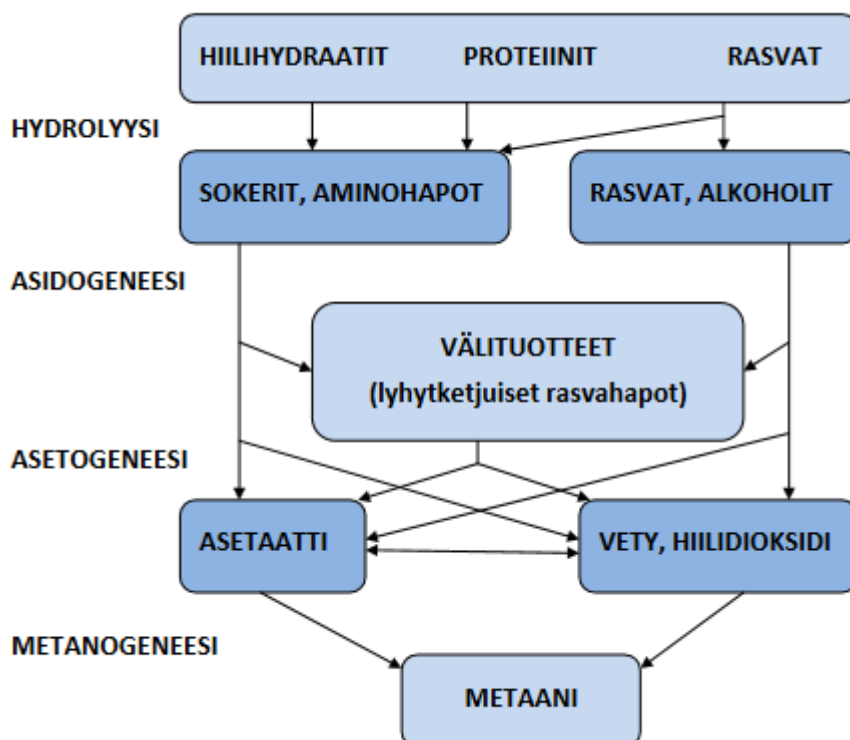
Kartoituksen tuloksena on saatu alustavia määriä orgaanisille jätteille, joita voitaisiin käyttää biokaasuntuotannossa. Syötteitä on etsitty kohtuullisen etäisyyden päästä itse biokaasulaitokselta.

## 2 BIOKAASUNTUOTANTOPROSESSI

Biokaasuntuotanto on mikrobiologinen prosessi, jossa orgaanista jätettä mädätetään sitä varten rakennetussa laitoksessa. Laitostyyppinä on kahdenlaisia: märkämädätyslaitoksia ja kuivämädätyslaitoksia, joista yleisimpänä pohjoismaissa käytettävänä teknologiana on märkämädätys. Laitostyyppit eroavat toisistaan kuiva-ainepitoisuuden ja sekoitusteknologian mukaan, joista kerrotaan myöhemmin. Molemmissa laitoskuvauksissa perustana ovat mikro-organismit, jotka käyttävät orgaanista biomassaa ravintonaan tuottaen biokaasua ja hajomatonta loppujäännöstä. Biokaasun pääkomponentit ovat metaani 55 – 75 % ja hiilidioksidi 25 – 45 %, sekä siinä on myös pieniä määriä rikkiyhdisteitä 0 – 0,05 %, typpiä 0 – 3 %, hiilimonoksidia, vetyä ja happea. Kaasunkoostumukseen vaikuttaa se, miten kaasu on tuotettu ja kerätty. (Kaasuyhdistys ry. 2022, 13)

### 2.1 Biokaasuntuotannon biologia

Biokaasulaitokselle saapuvan orgaanisen jätteen valintaan vaikuttavat laitoskokoontalon lisäksi myös paikallinen saatavuus sekä mädätysjäännöksen loppukäyttö. Raaka-aineiden soveltuvuutta voidaan arvioida muun muassa helposti hajoavan orgaanisen määrän, tuottopotentialin, kuiva-ainepitoisuuden, hiili/typpi- suhteen tai ravinne- ja hivenainekoostumuksen perusteella. Erilaisilla orgaanisilla yhdisteillä eli hiilihydraateilla, proteiineilla ja rasvoilla on erilaiset hajoamisominaisuudet, jolloin niiden biokaasun tuotto ja metaanipitoisuus vaihtelee. Orgaanisten yhdisteiden hajoamisprosessi voidaan jakaa neljään eri vaiheeseen. Kuvassa 1 on Sari Luostarisen suomennos Gujerin ja Zehnderin laatimasta vaihekuvauksesta. (Gujer, 1983)



KUVA 1. Eloperäisen materiaalin hajoaminen biokaasuprosessissa (Gujer ja Zehnder 1983). MTT-raportti 113, sivu 10 Luostarinen Sari ja Pyykkönen Ville

### 2.1.1 Hydrolyysi

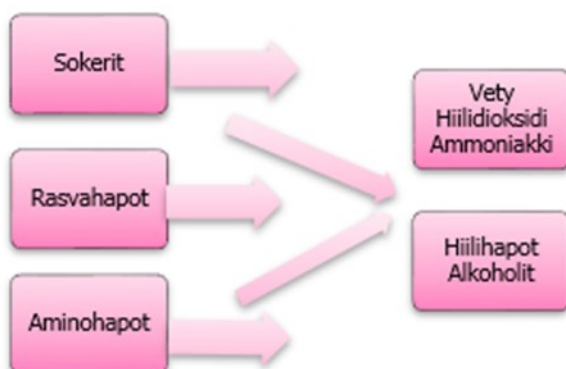
Ensimmäisessä vaiheessa eli hydrolyysissä pilkkotaan hiilihydraattien, proteiinien ja rasvojen koostumusta. Tähän työhön osallistuu hapontuottajamikrobien hydrolyyttiset entsyymit. Hydrolyysia tehostetaan pilkkomalla tai murskaamalla orgaanien aines noin 12 mm -palakokoon. Pienempi palakoko kasvattaa orgaanisen aineen pinta-alaa, joka mahdollistaa hydrolyyttisten entsyymien paremman hajoitusprosessin. (Luostarinen 2013, 10 -11.), (Teodorita Al Seadi, 2008) Hiilihydraattien hajotukseen osallistuvat amylaasientsyymit tuottavat sokereita, proteaasit hajottavat proteiineja tuottaen aminohappoja ja lipaasit hajottavat rasvoja tuottaen rasvahappoja ja glyserolia.



KAAVIO 1. Hajoamisprosessi hydrolyysissä

### 2.1.2 Asidogeneesi

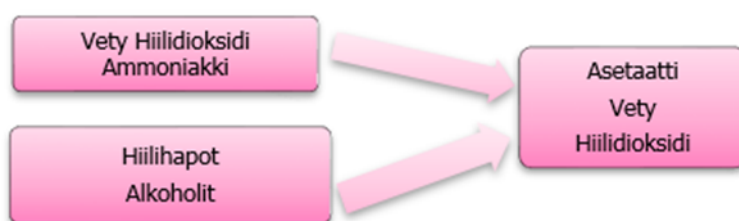
Toisessa vaiheessa, jota kutsutaan asidogeneesiksi tai fermentaatioksi tai happokäymiseksi, hapontuottajamikrobit kaappaavat sisälleen hydrolyysissä muodostuneet lopputuotteet ja jatkavat niiden pilkkomista. Lopputuotteena saadaan erilaisia lyhytketjuisia, haihtuvia rasvahappoja, kuten voihappoa, propionihappoa ja valeerihappoa. (VFA volatile fatty acids) (Luostarinen 2013,11) (Kymäläinen, Pakarinen 2015, 61 – 63) (Teodorita Al Seadi, 2008, 21-23) Fermentoituessaan syötteistä muodostuu ammoniakkia, hiilidioksidia ja vetyä. Vesi erottuu myös tässä vaiheessa prosessia. Syötteiden, olosuhteiden ja mikrobipopulaation koostumus vaikuttaa fermentaation tuotekoostumukseen. (Kymäläinen Maritta, 2015)



KAAVIO 2. Hajoamisprosessi asidogeneesissä

### 2.1.3 Asetogeneesi

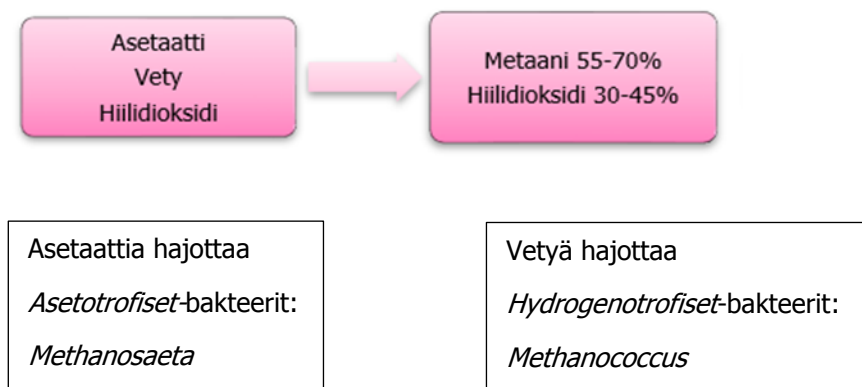
Kolmannessa vaiheessa eli asetogeneesissä edellisen muodostamista välituotteista tuotetaan ase- taattia, vetyä ja hiilidioksidia. Prosessista käytetään myös nimitystä anaerobinen hapettuminen, vaikka molekylaarista happea ei käytetä. Asetogeneesissä hapettuneet yhdisteet, kuten nitraatti, sul- faatti ja karbonaatit osallistuvat reaktioon aiheuttaen pelkistymistä. Prosessissa muodostuvaa vetyä pitää muodostua ja kulua tasapainoisesti. Tasapainon ylläpitämiseen osallistuvat asetogeeniset bak- teerit, jotka tuottavat asestaattia sekä metanogeeniset bakteerit, jotka hajottavat vetyä. (Kymäläinen Maritta, 2015) (Luostarinen, 2013) (Teodorita Al Seadi, 2008)



KAAVIO 3. Hajoamisprosessi asetogeneesissä

### 2.1.4 Metanogeneesi

Viimeisessä vaiheessa eli metanogeneesissä asestaatista, vedystä ja hiilidioksidista metanogeenit val- mistavat biokaasua eli metaania ja hiilidioksidia. Metaania muodostuu noin 70 % asestaatista ja lop- puosa vedystä. Asetotrofisten metanogeenien kasvaminen prosessissa on hidasta, joka vaikuttaa viipymääjan määrittämiseen etenkin jatkuvasekoitteisessa biokaasuprosessissa. (Luostarinen 2013, 11) (Kymäläinen Maritta, 2015 61-63) (Teodorita Al Seadi, 2008, 21-23)



KAAVIO 4. Hajoamisprosessi metanogeneesissä

## 2.2 Syötteiden tuottopotentialit

Biokaasulaitoksen sijainnilla, lopputuotteen käytöllä ja syötteiden saatavuudella on ratkaiseva merkitys valittaviin syötteisiin. Syötteiden kuljetusetäisyys vaikuttaa syötteiden hintaan ja sitä myöten laitoksen kannattavuuteen. Biokaasulaitoksen tuloista 2/3 saadaan porttimaksuista ja 1/3 lopputuotteiden myynnistä. (Pakarinen, 2022) Esimerkiksi SavoGrown Biokaasulla liikkeelle -hankkeessa pelto-biomassojen etäisyys on laskettu 25 kilometrin säteellä. (Saija Rasi, 2022) Lanta on hyvä perusta biokaasuntuotannolle sen mikrobien tarvitsemien ravinteiden vuoksi. Jätevedenpuhdistamojen lietteet pääsevät lannan kanssa suurin piirtein samoille tuotoille, toisaalta yhdyskuntien jätevesissä on enemmän prosessia haittavia lääkettäjämiä ja muita epäpuhtauksia. Tuottopotentialiaa kasvatetaan lisäämällä kasvibiomassaa lannan ja/tai jätevesilietteen sekaan. (Kymäläinen Maritta, 2015) (Luostarinen, 2013) Yleisimpiä syötteitä ovat lanta, peltobiomassat, erilliskerätty biojäte ja elintarvike- ja juomateollisuuden sivuvirrat.

### 2.2.1 Maataloudesta saatavien lantojen metaanintuottopotentialit

Maatalous on yksi merkittävimmistä syötteiden saatavuuteen vaikuttavista tekijöistä, sillä lantaa on saatavissa tasaisesti ympäri vuoden sekä se on melko tasalaatuista. Lanta yksinään ei sisällä korkeaa metaanintuottoa korkean vesipitoisuutensa vuoksi. Lisäksi siipikarjanlanta sisältää korkeita typipitoisuuksia, jotka häiritsevät biokaasuntuotantoprosessia. Taulukossa 1. on esitetty eri lantajakeiden metaanintuottopotentialit.

Taulukko 1. Lantatyypin ominaisuudet ja metaanintuottopotentialit.

Lantatyyppi	Total Solid TS kuiva-aine (%)	Volatile Solids VS orgaaninen aines (%TS kuiva-aineesta)	BMP metaanintuottopotentiali orgaanisesta aineesta (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /tVS) <sub>1</sub>	BMP metaanintuottopotentiali tuorepainosta (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /tTP) <sub>1</sub>	Lähde
<b>Naudan liete-lanta</b>	5 - 14	75 - 85	120 - 300	10 - 20	2, 3
<b>Sian liete-lanta</b>	4 - 10	75 - 86	180 - 490	12 - 24	2, 3
<b>Naudan kuiva-lanta</b>	17 - 25	68 - 85	126 - 250	24 - 55	2, 3
<b>Sian kuiva-lanta</b>	20 - 34	75 - 81	162 - 270	33 - 39	2, 3
<b>Siipikarjan-lanta</b>	32 - 65	63 - 80	150 - 300	42 - 156	2, 3

Lähteenä käytetty: 2. MTT-raportti 113, Sari Luostarinen ja 3. HAMK Biokaasuteknologia Maritta Kymäläinen sekä Outi Pakarinen

## 2.2.2 Maataloudesta saatavien peltobiomassojen tuottopotentialit

Lannan lisäksi tarvitaan hajoavaa orgaanista materiaalia, jota saadaan peltobiomassoista ja erikseen kasvatetuista energiakasveista. Lisäksi energiakasvien kasvatuksessa pitää ottaa huomioon kestävyyskriteerit. (Laki biopolttoaineista ja bionesteistä 393/2013. § 5, Koponen, Sokka 2019, 7 – 9.)

Potentiaalisiin energiakasvi on nurmi, mutta oljella, sokerijuurikkaan naateilla, ruoaksi kasvatettujen kasvien hävikillä sekä rehuntuotannon ylijäämällä/hävikillä saadaan biokaasuntuotantoa nostettua huomattavasti enemmän kuin pelkällä lannalla. (Luostarinen 2013, 13 – 14.) (Teodorita Al Seadi, 2008) Tärkein kasvibiomassojen valintaan vaikuttavista parametreistä on nettoenergian tuotto hehtaaria kohti, kun puhutaan energiakasveista. Kasvibiomassojen ikä vaikuttaa myös, sillä vanhentuneissa korsissa ligniini-, selluloosa- ja hemiselluloosapitoisuus kasvaa helposti hajoavien orgaanisten yhdisteiden kustannuksella. Kasvibiomassojen varastointiolosuhteet ja varastointiajan pituus vaikuttavat metaanintuotantoon, riippuen täysin lajikkeesta, korjuuajankohdasta ja säilöntämenetelmästä. (Lehtomäki 2006, 10 – 11.) Taulukossa 2. on tähän mennessä tutkittujen kasvibiomassojen tuottopotentiaaleja.

Taulukko 2. Kasvibiomassojen metaanintuottopotentiaaleja

Kasvibiomassa	BMP		Lähde
	metaanintuottopotentiaali orgaanisesta aineesta (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /tVS-1)	metaanintuottopotentiaali tuorepainosta (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /tTP-1)	
<b>Maissi</b>	312-410	-	2, 3
<b>Nurmi</b>	213-410	72-104	2, 3
<b>Olki</b>	240-320	199-260	2, 3
<b>Puna-apila</b>	280-300	41-68	2, 3
<b>Säilörehu</b>	306-372	72-104	2, 3
<b>Sokerijuurikkaan naatit</b>	340	34	2, 3
<b>Ruokohelpi</b>	253-351	47-117	2, 3

Lähde: 2. MTT-raportti 113, Sari Luostarinen ja 3. HAMK Biokaasuteknologia Maritta Kymäläinen sekä Outi Pakarinen

## 2.2.3 Yhdyskuntien biojätteistä ja teollisuuden sivuvirroista saatavien syötteiden tuottopotentialit

Biokaasun yhtenä syötteenä on mahdollista käyttää yhdyskuntien biojätteitä sekä puhdistamo- ja saostuskaivolietteitä. Elintarvike-, juoma-, rehu- ja panimoteollisuudessa sekä teurastamoissa syntyvä biojäte on huomattavasti tasalaatuisempaa yhdyskuntabiojätteeseen verrattuna. Yhdyskuntabiojätteiden, teollisuuden sivuvirtojen ja jätteiden metaanintuottopotentiaali on korkea monipuolisen orgaanisesti hajoavan materiaalin vuoksi. (Kymäläinen Maritta, 2015), (Luostarinen, 2013) (Teodorita Al Seadi, 2008). Haasteellista on syötteiden saaminen mahdollisimman puhtaana ilman lasia, metallia ja muoveja, etenkin kotitalouksilta kerätystä biojätteestä. Yhdyskuntabiojätteiden seassa on myös paljon eläinperäistä jätettä, joka vaatii hygienisointikäsittelyn. Lisähygienisointivaatimus tulee EU:n sivutuoteasetuksista EY asetus 1069/2009 sekä 142/2011. Yhdyskuntien erilliskerättyä biojätettä ei suositella pienemmille laitoksille esikäsittelyn työläyden ja lisäinvestointien takia.

Jätevedenpuhdistamoissa syntyvä lietteet koostuvat pääosin vedestä, jossa on hyvin vähän kiinteää ainesta. Kiinteänaineen määrää voidaan lisätä erilaisilla esikäsittelyillä, joilla vettä poistetaan. Jätevesiä tutkimalla on saatu selville lääkeaineiden ja erilaisten orgaanisten yhdisteiden määriä ja kulkeutumisia puhdistamoille. Osa näiden aineiden jäämistä on haitallisia biokaasun tuotannossa ja vaikeuttaa loppujäännöksen uudelleen käytettävyyttä. Puhdistamolietteet ovat helposti käsiteltäviä ja metaanintuotto on niissä hyvä. Suomessa jätevedenpuhdistuksessa käytettävä teknologia on korkealaatuaista ja suurin osa haitallisista aineista saadaan poistettua, joten loppujäännöstä on voitu käyttää peltolevityksessä. (Sanna Marttinen, 2014)

Taulukko 3. Yhteenveto eri biomassojen metaanintuottopotentiaaleista

<b>Teollisuuden ja yhdyskuntien jätteet sekä sivuvirrat</b>	<b>BMP metaanintuottopotentiaali orgaanisesta aineesta (m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/tVS-1)</b>	<b>Total Solid TS kuiva-aine (%)</b>	<b>Volatile Solids VS orgaaninen aines (%TS kuiva-aineesta)</b>	<b>Lähteet</b>
<b>Yhdyskuntien puhdistamoliete</b>	220 – 430	3,2	1,9	2, 14
<b>Yhdyskuntien biojäte</b>	300 – 450	28	26	2, 14
<b>Juomien valmistuksen jätteet</b>	450	11	10	14
<b>Leipomojätteet</b>	400	75	69	14
<b>Meijeri- ja maitojätteet</b>	420	6	5,4	14
<b>Muu rasvajäte</b>	800	40	36	14

Lähteenä käytetty: 2. MTT-raportti 113, Sari Luostarinen ja 14 TEM Biokaasuohjelmaa valmisteleavan työryhmän loppuraportti

### 2.3 Kestävyysskriteerit ja niiden laskentakaavat biokaasulle

Biopolttoaineiden kestävyyskriteerejä on määritelty kansallisessa lainsäädännössä sekä EU:n REDII-direktiivissä. REDII-direktiivi tulee koskemaan kiinteitä biomassoja ja biokaasun tuotantoa. Kestävyysskriteerit ovat sidottuja uusiutuvan energian tavoiteisiin ja sen myötä saataviin tukiin. Kestävyysskriteerit koskevat koko uusiutuvan energian tuotantoketjua sekä määrää että laatua. Raaka-aineiden alkuperä lasketaan laadullisiin kriteereihin ja kasvihuonekaasut (khk) mukaan lukien CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> ja N<sub>2</sub>O määrällisiin kriteereihin. (Koponen Kati, 2019) Biomassaan perustuvat biopolttoaineiden khk- kriteerit astuivat voimaan 2021 ja vanhemmat laitokset, jotka muutetaan biomassalla toimiviksi, lasketaan myös uusiksi laitoksiksi. Khk- kriteerit ovat sidottuja polttoaineen tehoon, jos polttoainetehto on 20 MW tai suurempi sekä biokaasulla tuotettu sähköteho on 0,5 MW tai suurempi. Biokaasulle on REDII

direktiivissä määritelty arvot lannalle, maissille ja biojätteelle. REDII-direktiivissä käytettävät standardimenetelmät perustuvat IPCC:n vuonna 2006 laatimaan Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories -asiakirjaan sekä (EU) 525/2013 ja (EU) 2018/841 -asetuksiin. Biokaasulaitos, joka käyttää mädätyksessä lantaa saa hyvitystä  $-45 \text{ CO}_{2\text{ekv}}/\text{MJ}$ , ja näin ollen biokaasun khk-arvo voi olla myös negatiivinen. Kuvassa 2. on esitetty direktiivien päästövähennysrajat ja vertailuarvot.

Taulukko 1. Nykyisen RES-direktiivin ja REDII:n asettamat päästövähennysrajat sekä fossiiliset vertailuarvot

	Nykyinen RES-direktiivi Päästövähennysraja	Fossiilinen vertailuarvo (g $\text{CO}_{2\text{ekv}}/\text{MJ}$ )	REDII Päästövähennysraja	Fossiilinen vertailuarvo (g $\text{CO}_{2\text{ekv}}/\text{MJ}$ )
<b>Biopolttoaineet</b>	60 % (2015 aloittaneet laitokset)	83.8 (liikenne)	65 % (2021 aloittaneet laitokset)	94 (liikenne)
<b>Bionesteet</b>	60 % (2015 aloittaneet laitokset)	91 (sähkö) 77 (lämpö) 85 (CHP)	65 % (2021 aloittaneet laitokset)	183 (sähkö) 80 (lämpö)
<b>Biomassapolttoaineet (<math>\geq 20\text{MW}</math> polttoaineteho kiinteille, ja <math>2\text{MW}</math> biokaasulle)</b>			70 % (2021) 80 % (2026) 65 % (biokaasu liikenteessä)	183 (sähkö) 80 (lämpö) 124 (lämpö jos korvataan hiiltä) 94 (liikenne)

KUVA 2. Tutkimusraportin päästövähennysrajat ja vertailuarvot (VTT-R-00887-19)

Oletusarvojen tai tyypillisten arvojen ja khk- päästöjen laskentaa REDII -direktiivin mukaisesti esitellään seuraavaksi. Oletusarvoja ( $P_n$ ) on REDII -direktiivissä määritelty maissille  $4,16 \text{ MJ}$  biokaasua / kg märkää maissia 65 % -kosteuspitoisuudessa, lannalle  $0,50 \text{ MJ}$  biokaasua / kg märkää lantaa 90 % -kosteuspitoisuudessa ja biojätteelle  $3,14 \text{ MJ}$  biokaasua / kg märkää biojätettä 76 %-kosteuspitoisuudessa. Täten vakioasteuspitoisuuden ( $SM_n$ ) arvoiksi saadaan maissille  $0,60 \text{ kg H}_2\text{O} / \text{kg}$  tuoretta materiaalia, lannalle  $0,90 \text{ kg H}_2\text{O} / \text{kg}$  tuoretta materiaalia ja biojätteelle  $0,76 \text{ kg H}_2\text{O} / \text{kg}$  tuoretta materiaalia. (Koponen Kati, 2019, 11) (Ferrari G, 2022)

Oletusarvojen yhdistäminen useista raaka-aineista valmistetun biokaasun tapauksessa (Koponen Kati, 2019, 27 - 29)

$$E = \sum_1^n S_n * E_n \quad (1.)$$

$E$  = khk- päästöt/biokaasun tai biometaanin sisältämä MJ kohti

$S_n$  = Raaka-aineen n osuus energiasisällöstä

$E_n$  = Päästö (g $\text{CO}_2/\text{MJ}$ )

Raaka-aineen n osuus energiasisällöstä lasketaan kaavalla 2.

$$S_n = \frac{P_n * W_n}{\sum_1^n P_n * W_n} \quad (2.)$$

$P_n$  = Energiantuotanto MJ /kg märkää raaka-ainetta

$W_n$  = Syötteen painokerroin

Syötteen painokerroin lasketaan kaavalla 3.

$$W_n = \frac{I_n}{\sum_1^n I_n} * \left( \frac{1-AM_n}{1-SM_n} \right) \quad (3.)$$

$I_n$  = syötteen määrä (t/a)

$AM_n$  = syötteen keskimääräinen kosteus (kg H<sub>2</sub>O/kg tuoretta materiaalia)

$SM_2$  = syötteen vakiokosteuspitoisuus

Tuotetun biokaasun tai biometaanin todelliset päästöt, jossa on mukana hyvitykset lannan käytöstä, lasketaan kaavalla 4.

$$E = \sum_1^n S_n * (e_{ec,n} + e_{td,syöte,n} + e_{l,n} - e_{sca,n}) + e_p + e_{td,tuote} + e_u - e_{ccs} - e_{ccr} \quad (4.)$$

$E$  = Kokonaispäästöt ennen energiamuuntoa

$S_n$  = raaka-aineen  $n$  osuus, osuutena mädätysssäiliöön syötettävästä määrästä

$e_{ec,n}$  = raaka-aineen  $n$  tuotannosta tai viljelystä aiheutuvat päästöt

$e_{td, raaka-aine, n}$  = raaka-aineen  $n$  kuljetuksesta aiheutuvat päästöt

$e_{l, n}$  = maankäytön muutoksista johtuvista hiilivarantojen muutoksista aiheutuvat annualisoidut päästöt raaka-aineen  $n$  osalta

$e_{sca, n}$  = raaka-aineeseen  $n$  liittyvistä paremmista maatalouskäytännöistä saatavat vähennykset päästöissä

$e_p$  = jalostuksesta aiheutuvat päästöt

$e_{td, tuote}$  = biokaasun ja/tai biometaanin kuljetuksesta ja jakelusta aiheutuvat päästö

$e_u$  = polttoaineen käytönaikaiset päästöt, ts. poltettaessa syntyneet kasvihuonekaasupäästöt

$e_{ccs}$  = hiilidioksidintalteenotosta ja geologisesta varastoinnista saatavat vähennykset päästöissä

$e_{ccr}$  = hiilidioksidin talteenotosta ja korvaamisesta saatavat vähennykset päästöissä.

#### 2.4 Toimintaedellytykset toimivalle biokaasuprosessille ja prosessia häiritsevät tekijät

Biokaasuprosessin toimivuudelle yksi tärkeimpiä ominaisuuksia on tasainen lämpötila ympäri vuoden. Sen vuoksi osa tuotetusta energiasta käytetään laitoksessa sisäisesti prosessin ylläpitoon ja ohjaukseen. Lämpötila voi asettua laajalle alueelle, mutta yleisesti märkämädätyslaitoksilla lämpötila asetuu, joko mesofiiliselle alueelle 35 – 43 °C tai termofiiliselle alueelle 50 – 55 °C. Korkeat lämpötilavaihtelut häiritsevät metanogeenien toimintaa ja hallittuna vaihtelualueena pidetään +/- 0,5 - +/- 2 °C. (Luostarinen, 2013) (Teodorita Al Seadi, 2008) (Kymäläinen Maritta, 2015) Mesofiilinen prosessi on helpommin hallittavissa ja sietää enemmän häiriöitä eri osa-alueilla kuin termofiilinen prosessi. Termofiilisessä prosessissa mikrobiaktiivisuus on korkeampaa ja siten lyhentää syötteen hajoamis-aikaa. Toisaalta riskit ammoniakkin muodostumisesta kasvavat lämpötilan kasvaessa. Ammoniakki on merkittävä prosessia häiritsevä tekijä. (Teodorita Al Seadi, 2008) (Kymäläinen Maritta, 2015) (Luostarinen, 2013)

Mikrobien aktiivisuus riippuu myös prosessin pH:sta. pH vaihtelee hajotusprosessin vaiheiden mukaan. Yleisesti biokaasuprosessissa pH asettuu lähelle neutraalia 7–8, jolloin hajotusmikrobit toimivat, vaikka eivät ole optimiolosuhteissa. Syötteiden synnyttämät happamat ja emäksiset hajoamistuotteet ja hiilidioksidin osapaine asettavat pH:n tyypilliselle tasolle.

Syötteiden koostumuksella voidaan vaikuttaa pH-tasapainoon. Hiilihydraattiset syötteet muodostavat happoja, jotka alentavat pH - arvoa, kun taas proteiinit ja urea tuottavat ammoniakkia nostaten pH-arvoa. Biokaasureaktorin pH-tasapainoon vaikutetaan puskurikyvyllä eli alkaliniteettiarvolla. Bikarbonaatti-ioneja muodostuu, kun hiilidioksidi liukenee veteen muodostaen hiilihappoa ja liuennut hiilidioksidi sekä ammoniakki muodostavat ammoniumbikarbonaattia. Hyvällä alkaliniteetillä estetään pH vaihteluja, mutta vakavamman häiriötilanteen sattuessa pH:ta ja alkaliniteettia voidaan nostaa natrium- ja kaliumbikarbonaatilla ( $\text{NaHCO}_3$ ,  $\text{KHCO}_3$ ) tai natrium- ja kaliumkarbonaatilla ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{K}_2\text{CO}_3$ ). Tämä taas saattaa lisätä suolojen määrää biokaasureaktorissa. (Luostarinen, 2013) (Kymäläinen Maritta, 2015) (Teodorita Al Seadi, 2008)

Rasvapitoiset syötteet hajoavat prosessissa pitkäketjuisiksi rasvahapoiksi (LCFA Long Chain Fatty Acids) sekä haihtuviksi rasvahapoiksi (VFA Volatile Fatty Acids). Korkeina pitoisuuksina ne voivat keääntyä prosessiin sekä aiheuttaa vaahoutumista. Vaikka rasvajäte on hyvä metaanintuottaja, niin niiden syöttäminen prosessiin vaatii erityistä tarkkuutta. Korkea LCFA ja VFA pitoisuus laskee pH-pitoisuutta, joka taas vaikuttaa mikrobien tehokkaaseen toimintaan. pH:ta mittaamalla päästään prosessia häiritsevän tekijän jäljille ja näin ollen voidaan säätää syötteiden määrää ja koostumusta. Alentunut pH-arvo kertoo happojen kertymisestä prosessiin, joka taas häiritsee metanogeenien toimintaa. Prosessia ylös ajettaessa on seurattava pH-arvon lisäksi myös vedyn muodostumista ja VFA-pitoisuutta. (Kymäläinen Maritta, 2015) (Luostarinen, 2013) (Teodorita Al Seadi, 2008)

Prosessia häiritseviä tekijöitä on myös korkea liunneen ammoniakin pitoisuus ( $\text{NH}_3$ ), jolloin metanogeenien toiminta häiriintyy. Ammoniakin hallintaan voidaan vaikuttaa lämpötilan laskulla ja nostamalla pH:ta. Korkea pH on hyvä mittari ammoniakin määrän kasvamiseen. Ammoniakkia kertyy korkean typpipitoisuuden syötteistä, kuten sian- ja kananlanta tai teurasjätteet. Toisaalta liukoinen ammoniakki on mädätysjäännöksessä oleva tärkein raaka-aine peltolannoitteena käytettäessä. (Teodorita Al Seadi, 2008) (Kymäläinen Maritta, 2015)

Desinfiointiaineet ja antibiootit ovat tehokkaimmat bakteeritoiminnan tuhoajat, joten näiden aineiden päätymistä prosessiin pitää välttää parhaimman mukaan. Erilaiset suolat ja liialliset metallipitoisuudet häiritsevät mädätysprosessia ja lisäävät rikkivedyn kanssa sulfideja, jotka sitovat prosessille tärkeitä hivenaineita. (Kymäläinen Maritta, 2015)

## 2.5 Biokaasun käyttökohteet

Biokaasua voidaan käyttää lämmityksessä, sähköntuotannossa ja liikennepolttoaineena. Yksinkertaisin ja helpoin tapa on käyttää biokaasua lämmityksessä, sillä se ei vaadi korkeampaa kaasunpuhdistuslaitteistoa, ja hätätapauksissa kattiloissa voidaan polttaa myös täysin puhdistamatonta biokaasua. Kaasukattilassa on kaasulle sopiva poltin ja ainoastaan kosteus poistetaan esimerkiksi kondenssikäivon avulla. Yhdistetty lämmön- ja sähköntuotanto (CHP= Combined Heat and Power) on yleisin energiantuotantomuoto biokaasulaitoksissa. Osa tuotetusta lämmöstä käytetään biokaasulaitoksen

ja etenkin reaktorin lämmittämiseen talvella sekä sähköä kulutetaan laitoksen pumppujen ja sekoittimien ja teknisentilan tarpeisiin. Tarvittava kulutettavan energian määrä on laitospaikoista, johon vaikuttaa sijainti, käytetyt materiaalit ja teknologia. (Luostarinen 2013, 17 – 18.) (Teodorita Al Seadi, 2008) (Saana, 2010) (Pakarinen, 2022) (Kymäläinen Maritta, 2015)

Biokaasua voidaan käyttää liikennepolttoaineena, jolloin laitoksen yhteyteen on rakennettava erillinen kaasun puhdistusyksikkö. Vakiintunein jalostustapa on vesipesu, jossa biokaasu syötetään 7–9 bar paineella vesikolonneihin, jolloin hiilidioksidi sitoutuu veteen. Vesipesun jälkeen kaasusta poistetaan kosteus ja kompressori avustaa kaasun paineistuksen varastoon. Tyypillisin varastointipaine on 200–300 bar. Vararatkaisuna hyödyntämättömälle biokaasulle on soihutpoltto. Tätä vaihtoehtoa käytetään vain silloin, kun hyödyntämislaitteisto on rikkoontunut tai huollettavana eikä laitoksella ole riittävästi varastointikapasiteettia. Soihutpoltolla pyritään vähentämään kasvihuonekaasuvaikutusta, jota metaani sisältää. Vararatkaisuna soihtu on jokaisella isommalla biokaasulaitoksella. Ainoastaan pienet biokaasulaitokset, jotka käsittelevät alle 5000 t/a syötettä, eivät ole velvollisia soihtua rakentamaan vaan niille riittää yksinkertainen lämpökattila. (Latvala, 2009) (Kaasuyhdistys ry, 2022)

## 2.6 Prosessit, komponentit ja BAT (Best Available Technology)

Biokaasulaitokset ovat jaettavissa kolmeen eri ryhmään niiden syötteiden käsittelykapasiteetin mukaan. Suuriin biokaasulaitoksiin lasketaan sellaiset laitokset, jotka käsittelevät > 35000 tn/a syötteitä. Keskikokoinen biokaasulaitos käsittelee 20000 – 35000 tn/a syötteitä ja pieneksi määritellään biokaasulaitos, jonka käsittelykapasiteetti < 20000 tn/a. Jokainen laitos tarvitsee ympäristöluvan. Laitoksen koosta riippuen ympäristöluvan myöntää joko AVI (Aluehallintovirasto) tai pienissä laitoksissa kunta tai AVI. (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2020) Biokaasulaitoksen prosesseista on valittavissa märkämädätys tai kuivämädätys, joista märkämädätys on yleisimmin käytetty ja jonka teknologia on vakiintunutta. Syötteiden lisääminen prosessiin voi olla jatkuvatoimista tai panostoimista. Lisäksi reaktorityyppi eroaa mädätystavan perusteella. Märkämädätyksessä käytetään jatkuva sekoitteista reaktoria, kun taas kuivämädätyksessä vakiintuneena reaktorina on tulppavirtausreaktori tai panosyötteinen autotallireaktori. (Latvala, 2009) (Teodorita Al Seadi, 2008) (Kymäläinen Maritta, 2015) (Luostarinen, 2013)

### 2.6.1 Laitoksen suunnittelu

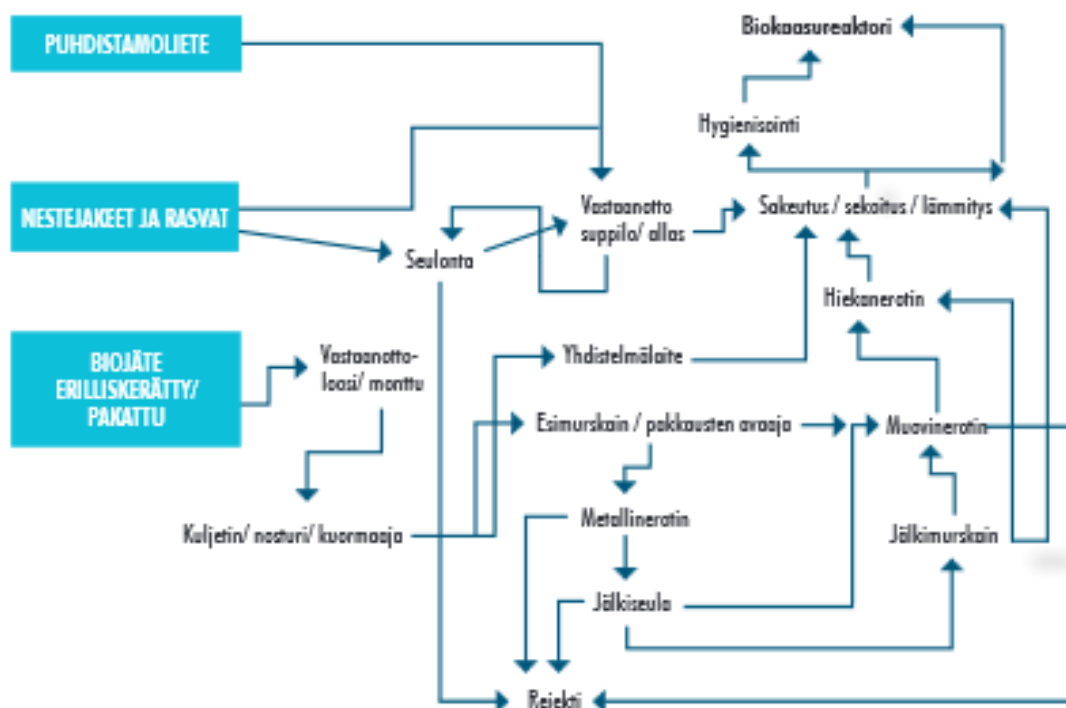
Laitoksen suunnittelu aloitetaan laitoksen sijainnin arvioinnilla. Sijaintiin vaikuttavat syötteiden saatavuus ja kuljetusetäisyydet, mädätysjäännöksen loppusijoitus ja kuljetusetäisyydet sekä tuotetun biokaasun loppukäyttö. Lisäksi YVA- menettelyn mukaan huomiota pitää kiinnittää hajuhaittoihin ja asutuksen läheisyyteen, sillä syötteiden kuljetuksesta voi tulla meluhaittaa, vaikka itse biokaasuprosessi on äänetön. Syötteet ja prosessi valitaan siten, että lopputuotteet voidaan hyödyntää tehokkaasti. Olisi tavoiteltavaa, että syötteiden saatavuuden takaamiseksi tehtäisiin mahdollisimman pitkäaikaiset sopimukset syötteiden tuottajien kanssa. Materiaalien ja laitteiden kestävyys sekä käytöikä takaa tasaisen prosessin käytettävyyden sekä vähentää ongelmia. Biokaasulaitosta suunniteltaessa olisi hyvä käydä keskustelut pelastusviranomaisten kanssa mahdollisista palosuojeluratkaisuista ja sammutussuunnitelmista. (Latvala, 2009) (Ville Pyykkönen, 2018) (Kaasuyhdistys, 2022)

## 2.6.2 Syötteiden saatavuus, esikäsittely ja varastointi

Laitostyyppi määrittää käytettävät syötteet Laitostyyppinä ovat maatilakohtainen biokaasulaitos, jätevedenpuhdistamon yhteydessä oleva biokaasulaitos ja yhteiskäsittelylaitos. Maatilakohtaisella biokaasulaitoksella käytetään peltobiomassaa ja lantaa, jotka sijaitsevat kohtuullisen etäisyyden päässä biokaasureaktorista. Jätevedenpuhdistamon biokaasulaitoksen syötteinä käytetään puhdistamolietettä sekä sakokaivo- ja teollisuuden jätevesilietettä. Yhteiskäsittelylaitoksella syötteiden käyttö on monipuolisempaa. Syötteinä voidaan käyttää erilliskerättyä biojätettä, maataloilta saatavaa biomassaa ja lantoja sekä puhdistamo-, sakokaivo- ja teollisuuden jätevesilietettä. (Kymäläinen Maritta, 2015) (Latvala, 2009) Syötteiden ominaisuuksien tunteminen on tärkeää, jotta voidaan laskea syötteistä saatava energiasisältö. Energiasisällön perusteella voidaan laskea biokaasun tuotto, jolla voidaan seurata prosessin toimintaa. Syötteille laaditaan laadukriteerit, joissa otetaan huomioon vastaanotto- ja varastointikäsittelyt, laitoksen prosessi (märkä- vai kuivamädätys), syntyvät jätevedet ja niiden puhdistus ja käsittelyjäännöksen hyödyntäminen ja sijoitus. Talousveden käyttöä välteään kaikissa prosessin vaiheissa ja pyritään suljettuun kiertoon. Syötteiden tunnettavuuden perusteella laaditaan syöttösuunnitelma ja suunnitelman seuranta. Syötteistä pyritään tunnistamaan soveltumattomat erät ja estää näiden vastaanotto.

Syötteiden valinnan jälkeen valitaan esikäsittelylle paras tekniikka. Esikäsittelyssä syötteet saatetaan prosessille sopivaan palakokoon sekä kohdistetaan vain tarvittaviin syötteisiin. Samalla poistetaan syötteistä sinne kuulumattomat jätejakeet, joille pitää olla omat sijoituspaikat ja loppusijoitus selvillä. Lisäksi hygienisointia vaativat syötteet lisätään syöteseokseen mahdollisimman myöhäisessä vaiheessa. Hajujen hallintaan vaikuttaa valitut syötteet ja niiden esikäsittely.

Laitoksen toimivuuden ja siisteyden kannalta on kiinnitettävä erityistä huomiota syötteiden varastointiin ja varastointiaikaan. Kuivat syötteet (esimerkiksi heinät ja tärkkelykset) varastoidaan kuiva-varastoissa. Nestemäiset syötteet vaativat tiiviit säiliöt ja varastointiaika mitoitetaan siten, että syöte ei ehdi hajota varastointiaikana. Varastointitilojen pohjarakenteiden pitää olla tiiviit ja varustettu viemärijärjestelmällä. Lisäksi varastojen poistoilma olisi hyvä käyttää CHP-laitoksella palamisilmana. Näin ollen järjestelmä vähentää ympäristöön kohdistuvaa hajuja, pölyä ja muita haitallisia aineita. Kuvassa 11. on esitelty biojätteiden, puhdistamo- ja rasvalietteiden esikäsittely biokaasuprosessia varten. HAMK Biokaasuteknologia julkaisu (Kymäläinen Maritta, 2015)



KUVA 4. Syötteiden esikäsittely biokaasuprosessissa (Kymäläinen Maritta, 2015)

### 2.6.3 Prosessin hallinta, huolto ja tarkkailu sekä energiatehokkuus

Biokaasulaitosta pyritään käyttämään mahdollisimman energiatehokkaasti ja prosessia seuraamalla estetään häiriötilanteiden syntyminen sekä katkokset metaanintuotossa. Märkämädätyslaitoksissa suurimpia energiankäyttäjiä on sekoitus sekä syötteiden esilämmitys, esikäsittely ja pumppaaminen. Laitosta suunniteltaessa energiankäytön minimoimiseen käytetään prosessissa syntyviä hukkalämpöjä erilaisten lämmönvaihtimien avulla. Laitoksen omaan sähkönkulutukseen sekä lämmitykseen pyritään käyttämään tuotettua ylijäämäenergiaa. Prosessin hallintaan ja tarkkailuun laaditaan ajosuunnitelma sekä seurantapäiväkirja. Ajosuunnitelman parametreinä käytetään viipymäaika, reaktorikuormitusta ja syöteseoksen koostumuksesta saatuja laskelmia. Ajosuunnitelmasta löytyvät myös laitteiden kalibrointiajankohdat, laitteiden ja instrumenttien käytön määrittely sekä kunnossapito ja huoltosuunnitelma. Prosessimittauksiin kuuluvat reaktorin lämpötila ja pinnankorkeus, pH, biokaasuntuotto sekä metaanipitoisuus, jotka ovat kriittisiä pisteitä prosessin seurannassa. Tarkempia mittauksia tehdään näytteenottojen ja laboratorioanalyysien avulla. Laitoksen ongelmatilanteiden varalle on laadittava seuranta- ja tarkkailusuunnitelma. Suunnitelma sisältää ohjeita, joilla voidaan vähentää vaaraa poikkeustilanteissa seuraavissa laitoksen toimintapisteissä:

- Syötteiden käsittely- ja varastointitilat/alueet
- Sähkö- ja automaatiotilat
- Kriittisten pisteiden valvonta
- Hygienesointiyksikön valvonta
- Biokaasun käsittely- ja hyödyntämislaitteistot ja niiden tilat
- Mekaanisen tai termisen kuivauksen toiminta ja tilat

Tarkempia kuvauksia eri turvallisuuskohdista ja käytettävistä standardeista löytyy Turvallisuus- ja kemikaaliviraston sivuilta (Tukes, 2015). Biokaasuun käytetään samoja standardeja kuin maakaasuun laitteiden, säiliöiden ja putkistojen osalta. (Teodorita Al Seadi, 2008) (Kymäläinen Maritta, 2015) (Latvala, 2009) (Luostarinen, 2013)

#### 2.6.4 Lopputuotteiden käsittely, varastointi ja hyödyntäminen sekä päästöt ilmaan ja veteen

Laitosta suunniteltaessa pitää huomioida lopputuotteiden tehokas käyttö sekä kaasun että mädätysjäännöksen osalta. Mahdollisiin häiriötilanteisiin varaudutaan turvajärjestelmillä, joissa syntyvä biokaasu saadaan hallitusti poltettua vähemmän haitalliseen muotoon. Isoissa laitoksissa käytetään soih tupolttoa ja pienemmissä laitoksissa polttokattila mitoitetaan siten, että se kykenee polttamaan kaiken syntyvän kaasun. Biokaasun loppukäyttöä suunniteltaessa pitää ottaa huomioon kaasun puhdistus ja jalostus mahdollisimman energiatehokkaasti. Biokaasu sisältää paljon kosteutta ja veden poisto on perustoimenpide ennen polttoa. Biokaasun jalostus vaatii puskurivarastointia kaasun laadun tasaamiseksi sekä jatkuvaa kaasunkoostumuksen mittaamista. Käsittelyjäännöksen hyödyntäminen nostaa laitoksen käyttöastetta. Yleisimmät hyödyntämistavat ovat kompostointi tai kierrätyslannoitteena käyttö. Käsittelyjäännöksestä pitää poistaa vesi mahdollisimman energiatehokkaasti ja halutun loppukäytön mukaan. Taulukossa 4. on esitelty yleisimmät menetelmät käsittelyjäännökselle.

TAULUKKO 4. Mädätysjäännöksen käsittelymenetelmät (Luostarinen, 2013)

Toimintaperiaate	Menetelmä
Ominaispainoon perustuva	Laskeutus, linko
Partikkelikokoon perustuva	Seula, ruuvikuivain, suotonauha, kalvotekniikat
Termiset menetelmät	Haihdotus, kuivaus

Erotusprosesseja voidaan tehostaa polymeereillä, joiden käytössä pitää huomioida polymeerin syöttöajankohta, käsittelyjäännöksen lämpötila ja koostumus. Erotteluprosessista saatava nestejäte on hyödynnettävissä sellaisenaan lannoitekäytössä tai se voidaan jalostaa esimerkiksi strippaamalla, haihuttamalla tai kalvotekniikkaa hyväksi käyttäen.

Biokaasulaitoksen jokaisessa vaiheessa pitää ottaa huomioon mahdolliset päästöt sekä ilmaan että veteen. Ilmavirtojen kulkeutumista huomioidaan suunnitteleamalla säiliöiden, altaiden ja kulkuovien kokoa siten, että hajukaasut saadaan konsentroitua ja ilmavirrat minimoitua. Hajukaasujen käsittelyssä voidaan käyttää biologisia suodattimia tai kemiallisia pesureita. Käsitellyt hajukaasut käytetään polttoilmana tai johdetaan ulkoilmaan siten, että hajukaasuista aiheutuu mahdollisimman vähän haittaa lähiympäristölle. Pieniltä laitoksilta (<5000 t/a), joissa käsitellään lietteitä ja kasvibiomassaa ei edellytetä hajukaasujen käsittelyä, mutta termisen- tai mekaanisen kuivauksen yhteydessä käsittelyä vaaditaan. Hajukaasut on otettava huomioon rejektivesiä käsiteltäessä. Laitoksella syntyvien jätevesien määrää pyritään minimoimaan mukaan lukien rejektivedet. Jätevesien ja rejektivesien käsittelyyn on useampia tekniikoita, joista yleisimpiä ovat selkeytys altaassa, flotaatio, biologinen

nitrifikaatio–denitrifikaatioprosessi, fosforin poisto kemiallisesti ja hiekkasuodatus tai kalvosuodatus. Biokaasulaitos, joka sijaitsee jätevedenpuhdistamon läheisyydessä, voi ohjata jätevedet ja rejektiveden jätevedenpuhdistamolle. (Luostarinen, 2013) (Latvala, 2009) (Sanna Marttinen, 2014)

### 3 BIOKAASUREAKTORIN MITOITUSKAAVAT

Biokaasureaktorin kuormitusta laskettaessa käytetään ORL (Organic Loading Rate) - laskentakaavaa. Kaavassa käytettävä VS-pitoisuus tarkoittaa orgaanista-ainetta, joka on tietty prosenttiosuus TS-pitoisuudesta. Kuten osiossa 2.2 on mainittu, niin märkäprosessissa VS-pitoisuus saa olla maksimissaan 15 %.

#### 3.1 Reaktorin tilavuus ja viipymäaika

Orgaanisen aineen kuormitus ORL (Organic Loading Rate)

$$ORL = \frac{m \cdot c}{V_R} \quad (5.)$$

ORL = orgaaninen kuormitus (kgVS/m<sup>3</sup>d)

m = syötteen massa (t/d)

c = syötteen VS-pitoisuus (15%/100)

V<sub>R</sub> = reaktorin lietetilavuus (m<sup>3</sup>)

ORL-laskelmaa voidaan muokata, jolloin se kertoo tarvittavan nestetilavuuden. Tämän lisäksi reaktorin tilavuuteen pitää lisätä 15-20 % kaasutilavuutta. ORL-arvon antamalla kuormituksella saadaan arvio reaktorin käsittelykapasiteetista, mutta käytännön koetoiminnalla etsitään sopiva maksimaalinen kuormitustaso. Kuormitustasoon vaikuttaa käytettävien syötteiden eritasoinen hajoaminen ja mahdolliset prosessia häiritsevät tekijät. (Luostarinen, 2013) (Kymäläinen Maritta, 2015)

Viipymäaika HRT (Hydraulic Retention Time)

$$HRT = \frac{V_R}{V} \quad (6.)$$

HRT = Hydraulinen viipymä (vrk)

V<sub>R</sub> = Reaktorin tilavuus (m<sup>3</sup>)

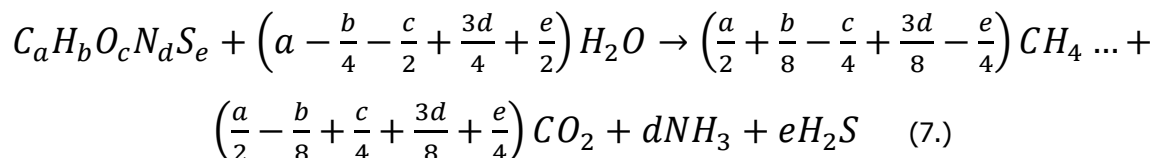
V = Syöttötilavuus aikayksikössä (m<sup>3</sup>/vrk)

HRT:n määrittämisessä on otettava huomioon syötteiden koostumus ja olosuhteet, sekä se kuinka pitkälle orgaaninen hajoaminen halutaan viedä reaktorissa. Liian pitkälle viety viipymäaika alkaa vaurioittamaan prosessissa tarvittavaa mikrobikantaa ja lisää siten häiritseviä tekijöitä. Täyssekoitteisissa reaktoreissa liian lyhyt viipymäaika lisää mikrobikannan huuhtoutumista jälkikaasutusaltaseen. HRT ja ORL ovat vahvasti sidoksissa toisiinsa, jolloin korkeampi kuormitus lyhentää viipymää, Lisäksi syötteen korkealla vesipitoisuudella on viipymää lyhentävä vaikutus. (Luostarinen, 2013) (Kymäläinen Maritta, 2015)

### 3.2 Metaanintuotto

Metaanintuottoa voidaan arvioida käyttämällä Buswellin yhtälöä, joka kuvaa orgaanisen aineksen hajoamista. Buswellin yhtälö antaa aina melko ylioptimisten määrän, joten luotettavamman tuloksen saa panoskokeilla tai käyttämällä syötekohtaisia viitearvoja. Viitearvoja on esitelty tarkemmin luvussa 2.1.1. Markkinoilla on saatavilla pienimuotoisia testilaitteistoja tai vaihtoehtoisesti metaanintuottotestin voi teettää asiaan perehtyneillä ammattikorkeakouluilla ja yliopistoilla. (Moller H, 2003) (Kymäläinen Maritta, 2015)

Buswellin yhtälö (Buswell)



$$B_u = \frac{\left( \frac{n}{2} + \frac{a}{8} + \frac{b}{4} \right) 22,4}{12n + a + 16b} 1CH_4 kg^{-1} VS \quad (8.)$$

Virtaamamittareiden kaasuntuotto ja -kulutus ilmoitetaan kuutiometreinä (m<sup>3</sup>), joka muutetaan normikuutiometreiksi (Nm<sup>3</sup>) kaavalla 9.

$$V_2 = \frac{P_1 * V_1 * T_2}{T_1 * P_2} \quad (9.)$$

V<sub>2</sub> = Kaasun tilavuus NTP-olosuhteissa (Nm<sup>3</sup>)

P<sub>1</sub> = vallitseva ilmanpaine + sääsuojaluvun lisäpaine

V<sub>1</sub> = mitattu kaasutilavuus (m<sup>3</sup>)

T<sub>2</sub> = Kaasun lämpötila NTP-olosuhteissa (273,15K)

T<sub>1</sub> = Kaasumittarin lämpötila (K)

P<sub>2</sub> = Kaasunpaine NTP-olosuhteissa (101,3 kPa)

### 3.3 Reaktorin lämpöenergian tarve

Reaktorin lämpötila pidetään mesofiiliselle prosessille sopivalla alueella +37° C tuomalla lämpöenergiaa ulkopuolelta lämmittämällä vettä tuotetusta biokaasusta. Tarkempia laskelmia on tehty Maaningan koelaitoksella BIOTILA-hankkeen perusteella. Hankkeessa mitattiin maaperän-, ulkoilman-, maanpinnan ja syötteiden lämpötilat vuoden ajan. Reaktorin lämpöenergian tarve lasketaan kaavalla 10. (Luostarinen, 2013)

$$E_{th} = E_{syöte} + E_{häviöt} \quad (10.)$$

$E_{th}$  = Reaktorin lämpöenergian tarve (kWh/d)

$E_{syöte}$  = Lämpöenergian tarve syötteille (kWh/d)

$E_{häviö}$  = Reaktorin ympäristöön luovuttama lämpöenergia (kWh/d)

Syötteiden lämpötilan ja reaktorin lämpötilan välinen erotus pidetään mahdollisimman pienenä, tässä voidaan käyttää syötteiden esilämmitystä tai lämmitettyä tilaa syötteille. Teoreettinen  $E_{syöte}$  lasketaan kaavalla 11. (Luostarinen, 2013) (Kymäläinen Maritta, 2015)

$$E_{syöte} = \frac{c \cdot ORL \cdot (T_r - T_s)}{3,6} \quad (11.)$$

$E_{syöte}$  = Lämpöenergian tarve syötteille

$c$  = Veden ominaislämpökapasiteetti 4,186 kJ/(kgK)

$T_r$  = Reaktorin lämpötila

$T_s$  = Syötteen lämpötila

Tyypillisesti reaktori valmistetaan betonista ja se eristetään parhaalla mahdollisella tavalla. Eristämisestä huolimatta lämpöhäviöitä ympäristöön tulee kuitenkin.  $E_{häviöt}$  lasketaan kaavalla 12. (Luostarinen, 2013)

$$E_{häviöt} = A_r \cdot U_s \cdot \Delta T_s \quad (12.)$$

$E_{häviöt}$  = Reaktorin ympäristöön luovuttama lämpö (kWh/d)

$A_r$  = Reaktorin pinta-ala (m<sup>2</sup>)

$U_s$  = Reaktorin osien yhteenlaskettu lämmönläpäisykerroin (W/m<sup>2</sup>K)

$\Delta T_s$  = Reaktorin sisälämpötilan ja ympäristön lämpötilan erotus (K)

Lämmönläpäisykerroin ja lämmönvastus lasketaan kaavalla 13 a ja b, josta a on lämmönläpäisykerroin ja b on lämmönvastus.

$$U = \frac{1}{(R_1 + R_2 + R_n)} \quad (13.a)$$

$U$  = Lämmönläpäisykerroin (W/m<sup>2</sup>K)

$R_1 \dots R_n$  = Reaktorin seinämien lämmönvastukset

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (13.b)$$

R = Lämmönvastus

d = Seinämän paksuus

$\lambda$  = Materiaalin lämmönjohtavuus (W/m<sup>2</sup>K)

### 3.4 Wobbe-indeksin laskentakaavat

Wobbe-indeksin avulla etsitään sopivat komponentit kyseiselle kaasulle. Wobbe-indeksissä on määritetty ylempi- ja alempi lämpöarvo, jossa vaihteluväli on 5 % luokkaa. Yksikkönä käytetään MJ/Nm<sup>3</sup>, josta Nm<sup>3</sup> on 1 kuutio normaalissa ilmanpaineessa eli 1013,25 hPa ja lämpötila 0° C. Wobbe-indeksi lasketaan kaavalla 14 a ja b.

$$I_w = \frac{V_c}{\sqrt{G_s}} \quad (14.a)$$

$I_w$  = Wobbe-indeksi

$V_c$  = ylempi lämpöarvo

$G_s$  = suhteellinen tiheys

$$G_s = \frac{M}{M_{ilma}} \quad (14.b)$$

$G_s$  = suhteellinen tiheys

M = kaasun moolimassa

$M_{ilma}$  = ilman moolimassa noin 28,96 kg/kmol

Luonnonvarakeskus on julkaissut biokaasulaskurin, jolla voi tehdä alustavat laskelmat omalle biokaasu projektille. Laskurissa on yhdeksän vaihetta ja näissä vaiheissa pääsee tekemään valintoja sekä antamaan alustavia arvoja. Rajoitteena on syötemäärä, joka ei voi ylittää 15000 tonnia. (<https://maatalousinfo.luke.fi/fi/laskurit/biogas>)

## 4 BIOKAASUN JALOSTUS

Raaka biokaasu sisältää enimmäkseen metaania ja hiilidioksidia. Jotta biokaasua voitaisiin käyttää liikennepolttoaineena se pitää puhdistaa hiilidioksidista sekä kosteudesta. Käytetyimpiä menetelmiä, joilla hiilidioksidia poistetaan, on vesiabsorptio, paineenvaihteluabsorptio (PSA) ja membraanitekniikka. Jalostusyksikön jälkeen biokaasua käsitellään kuin maakaasua. Maakaasukäsikirjassa löytyy tärkeimmät ohjeet kaasuputkistoille ja varastoinnille. (Kaasuyhdistys, 2022) (Tukes, 2015) (Ferrari G, 2022)

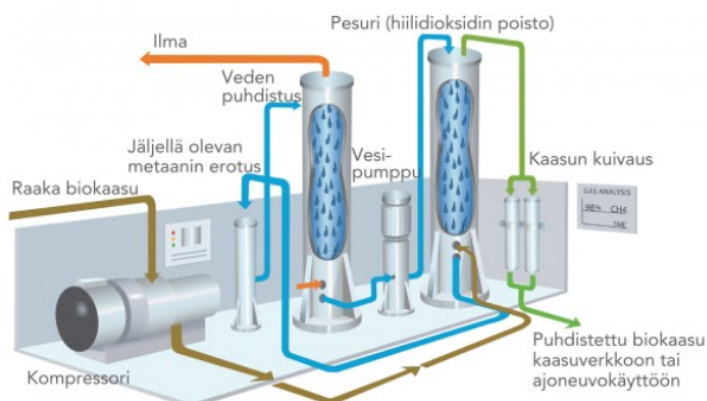
#### 4.1 Vesiabsorptio-menetelmä

Vesiabsorptio on yleisin käytetty tekniikka pienissä biokaasulaitoksissa, sillä se on kustannustehokain ja vähän tilaa vievä menetelmä.



KUVA 5 Vesiabsorption-menetelmä kuvaus (Macon Oy, 2018. kalvo 9)

Vesiabsorptiossa puhdistettu vesi pumpataan pystykolonnin yläpään ja paineistettu kaasu -kolonnin alapuolelle. Kaasu puhdistuu, kun paineistetun raakakaasun sisältämä hiilidioksidi ja rikkivety liukenevat vastaan virtaavaan veteen paineen ja lämpötilan vaikutuksesta. Puhdistuslaitteistossa käytettävä vesi voidaan regeneroida. Regenerointi tapahtuu painetta laskemalla, jolloin liuennut metaani saadaan talteen ja lisäämällä regenerointivaiheessa ilmaa veteen saadaan hiilidioksidi eroteltua vedestä. Vesiabsorptio on tällä hetkellä kustannustehokain ja eniten käytetty puhdistusmenetelmä. Jalostetun kaasun hinnaksi tulee noin 0,15 €/Nm<sup>3</sup> ja kaasun puhtaus on 98% luokkaa. (Liljeblad, 2017) (Ahonen, 2010)



KUVA 6. Greenlane-vesipesurin toimintaperiaate (www.sarlin.com sivustolla käyty 28.9.2022)

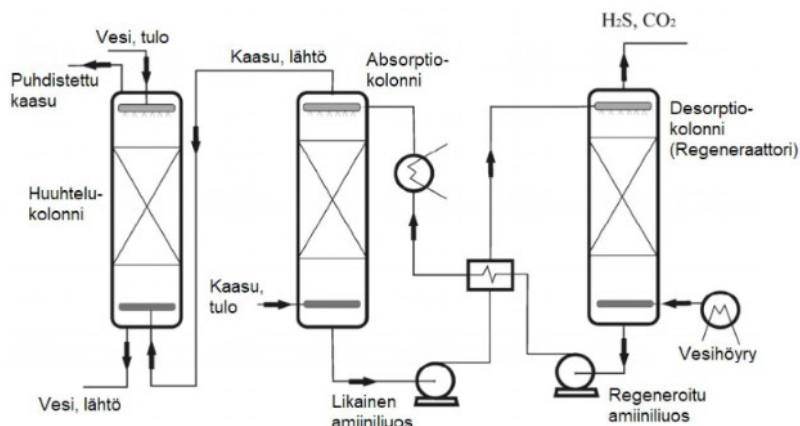
#### 4.2 Amiinipesuri



KUVA 7. Amiinipesurin menetelmä kuvaus (Huertas, 2011)

Amiinipesuri on kemiallinen versio vesipesurista. Molemmat ovat absorptiomenetelmiä, joissa kaasu-ainetta imeytetään toiseen aineeseen. Raaka biokaasu sisältää hiilidioksidia ja rikkivetyä, joka imeytetään amiinipesurissa Monoetanoliamiiniin (MEA), Dietanoliamiiniin (DEA) tai Metildietanoli-amiiniin (MDEA). Nämä ovat ammoniakista johdettuja orgaaniskemiallisia yhdisteitä, joilla on korkea kyky imeyttää itseensä hiilidioksidia ja rikkivetyä. Amiinipesuri toimii siten, että raaka biokaasu johdetaan absorptiokolonniin, jossa hiilidioksidi ja rikkivety imeytyy amiiniin. Seuraavaksi amiinipesurin sisältö ajetaan vesipesuriin, jossa amiinijäämät poistetaan ja johdetaan desorptiokolonniin (Re-

generaattori). Kylläinen amiini puhdistetaan regeneraattorissa ja puhdistettu amiini johdetaan lämmönvaihtimen läpi takaisin kiertoon. Amiinipesussa metaanin puhtaus on 98-99 % luokkaa ja jalostetun kaasun hinnaksi tulee noin 0,28 €/Nm<sup>3</sup>. (Huertas, 2011) (Liljeblad, 2017)



KUVA 8. Virtauskaavio Amiinipesurista (Nuotio, 2020) (Huertas, 2011)

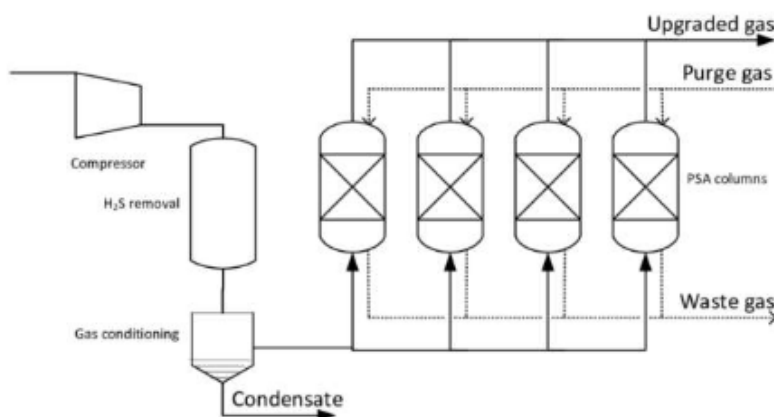
#### 4.3 PSA-tekniikka

Paineenvaihteluadsorptio PSA (Pressure Swing Adsorption) -menetelmässä on useampia kolonneja, joiden painetta vaihdellaan. PSA-tekniikalla saadaan hiilidioksidin lisäksi poistettua vesi, rikkivety, siloksaanit ja halogenoidut yhdisteet. Kaasu puhdistuu jopa > 98 %:sti. PSA-tekniikkaa käytetään yleisesti kaatopaikkakaasujen puhdistuksessa. (Ahonen, 2010) (Liljeblad, 2017) (Kaasuyhdistys, 2022)



KUVA 9. PSA-tekniikan menetelmäkuvaus.

PSA-tekniikka toimii siten, että raaka biokaasu johdetaan ensimmäiseen kolonniin korkealla paineella, jossa poistettavat epäpuhtaudet kiinnittyvät adsorptiomateriaaliin. Adsorptiomateriaalina voidaan käyttää kalvotekniikkaa tai aktiivihieiltä. Adsorptiomateriaalin kyllästettyä kolonne siirtyy regenerointivaiheeseen eli paineen laskuun ja samalla puhdistunut kaasu johdetaan seuraavaan kolonniin, jossa painetta taas nostetaan ja adsorptio alkaa alusta. PSA-tekniikassa on vähintään neljä kolonnia, joissa jokainen kolonne on joko paineen nosto- tai laskuvaiheessa. PSA-tekniikalla puhdistetun kaasun hinta on noin 0,26€/Nm<sup>3</sup>.



KUVA 10. Virtauskaavio PSA-prosessista (www.oamk.fi sivustolla käyty 28.9.2022) (Macon Oy, 2018)

#### 4.4 Membraaniteknologia

Membraaniteknologia perustuu molekyylien läpäisevyyteen eri membraaneissa. Teknologia perustuu joko erotustekniikkaan tai absorptiotekniikkaan, jossa erotustekniikassa membraanin molemmilla puolilla on kaasufaasi ja absorptiotekniikassa on kaasufaasi ja membraanin toisella puolella nestettä.



KUVA 11. Membraanitekniiikan menetelmäkuvaus. (Macon Oy, 2018)

Membraaniteknologia on kalvotekniikkaan perustuva erotteluprosessi, jossa erottava tekijä on joko homogeeninen tai heterogeeninen rakenne. Homogeenisessä rakenteessa kalvossa käytettävät reiät ja huokokset ovat samankokoisia ja -muotoisia, kun taas heterogeenisessä rakenteessa kalvon reiät ja huokokset ovat erikokoisia ja -muotoisia. Membraaniteknologiassa on symmetrisiä ja asymmetrisiä membraaneja, joiden toimintaperiaatteet eroavat toisistaan. Symmetrisessä membraanissa käytetään huokoisia tai ei-huokoisia materiaaleja, jotka perustuvat symmetrisissä huokosissa molekyylien kokoon ja asymmetrisessä membraanissa diffuusion eli paine-eroon. Asymmetriset membraanit ovat kaksikerroksisia, joissa päällimmäinen pintakerros on suodattava osa ja sen alla on tukikerros pitämässä pakettia koossa. Membraaniteknologia on modulaarinen, joten laitteiston kokoa voidaan skaalata lisäämällä moduuleja joko rinnan tai sarjaan. Membraanitekniiikan etuja ovat halvemmat huoltokustannukset ja laitteisto on kohtalaisen edullinen. Membraaniteknologiassa kaasun puhtaus jää heikoksi ollen noin 89 % ja puhdistetun kaasun hinta on noin 0,20€ Nm<sup>3</sup>. (Ahonen, 2010) (Kaasuyhdistys, 2022) (Liljeblad, 2017)



KUVA 12. Membraanimoduuli (kuvakaappaus videosta <https://youtu.be/ftvdkvPGtEI> sivustolla käyty 28.9.2022 Bright BioMethane)

## 5 KAASUN VARASTOINTI

Biokaasua varastoidaan monessa eri vaiheessa. Ensimmäinen varastointi tapahtuu reaktorin yllä olevaan sääkupuun, joka toimii välivarastona, samoin jälkikaasutusaltaan sääkupu toimii välivarastona. Välivarastot voidaan jakaa matalapaineisiin tai korkeapaineisiin varastoihin. Reaktorin yllä toimiva välivarasto on kaksoiskalvosäiliö, jossa uloin kerros toimii sääsuojana ja sisempi kalvo joustaa muodostuvan kaasun mukaan. Ulompikalvo pysyy muodossaan sinne pumpattavan ilman ansiosta. Tämän välivaraston etuina ovat halpa hinta ja se, että varasto kestää hyvin biokaasun sisältämät epäpuhtaudet ja kosteuden. Kaasukello toimii samalla periaatteella, mutta on muodoltaan pyöreämpi ja erillään reaktorista. Optimaalisinta olisi kaasukellon käyttö kaasufaasille, vaikka kaasukello vie paljon tilaa. (Söderena, Biometaanin välivarastointi ja varastointi ajoneuvoissa: Tulevaisuuden mahdollisuudet, 2019) (Ahonen, 2010)



KUVA 13. Kaksoiskalvo välivarasto, jossa on kaasun ulostulo. (Zorg biogas)

Korkeapaineiset kaasusäiliöt eli paineastiat ovat puhdistetulle biometaanille tarkoitettuja varastoja. Paineastiat voivat olla kiinteästi asennettuja tai liikuteltavia kevyempiä kontteja. Paineastiassa kaasun paine on korkea 200 - 250 bar, joka tulee nopeaan kaasutankkaukseen tarvittavasta paineesta. Paineastian materiaalina toimii teräs tai komposiitti ja materiaalin valintaan vaikuttaa astian liikuteltavuus. Paineastioiden yleisin muoto on lieriö pyörästetyillä päillä, sillä niiden tilantarve on vähäinen.

Biometaanin säilytyksessä terässäiliöissä pitää kiinnittää huomiota biometaanin puhtauteen, sillä rikkiyhdisteillä ja kosteudella on voimakas korroosiota edistävä vaikutus. (Söderena, Biometaanin välivarastointi ja varastointi ajoneuvoissa, 2019) VAK-direktiivi määrää paineastian merkitsemisen pii-merkillä, jolla todistetaan laitteen täyttävän vaatimukset. Paineastiasta on löydettävä käyttöönotovuosi ja viimeinen käyttövuosi sekä CE-merkintä. Paineastioita saa kuljettaa vain ADR-koulutuksen käynyt henkilö. Paineastiat luokitellaan viiteen eri tyyppiin valmistusmateriaalin mukaan. Kaasunvarastoinnissa yleisesti käytetään tyyppin I teräsastioita, sillä ne asennetaan pysyvästi paikalleen ja ovat edullisempia valmistaa. Liikuteltavat paineastiat ovat tyyppiltään II – V, jotka ovat metallien, lasi- ja hiilikuitujen, polymeerien tai komposiitin yhdistelmiä. Paineastiat ovat kevyempiä, mutta niiden valmistaminen on haastavampaa ja kalliimpaa. Ajoneuvoissa säilytettävät säiliöt on luokiteltu neljään eri ryhmään valmistusmateriaalin suhteen. CNG-1 materiaalina teräs, kun taas CNG-2- ja CNG-3-säiliöiden materiaalina on metallivuoraus, jossa lieriöosa on päällystetty hartsikyllästetyillä jatkuvilla filamenttikuiduilla. CNG-4 säiliö puolestaan on kokonaan komposiittimateriaalia. Kuvassa 12 on tyyppin III astioin täytetty kaasunarasto ja kuvassa 13 on kaasuautoon asennettava CNG-2-luokan säiliö. (Söderena, 2019, ss. 20-34) (Jäkäläniemi, 2019, ss. 17-18)



KUVA 14. Monisäiliökontti (MEGC) ([www.vtt.fi](http://www.vtt.fi) TUTKIMUSRAPORTTI VTT-R-06978-18)



KUVA 15. CNG-2 luokan säiliö henkilöautossa. (Jere Jäkälänemi: Bensiinikäyttöisen henkilöauton muuttaminen biokaasukäyttöiseksi, sivu 18)

## 6 KAASUN KÄYTTÖ LIIKENNEPOLTTOAINEENA

Raakakaasussa olevat epäpuhtaudet poistetaan puhdistuskolonissa ja näin ollen metaanipitoisuus nousee jopa 98 %. Puhdistettua biokaasua kutsutaan biometaaniksi ja sitä käsitellään kuin maakaasua putkistojen, säiliöiden venttiilien ja polttimien osalta. Kaasua käsittelevien tuotteiden sekä laitteiden pitää olla ATEX-asetuksen hyväksymiä, ja lisäksi kansallinen lainsäädäntö ohjaa laitteiden ja komponenttien valmistusta ja asennusta. (Direktiivi 2014/34/EU Räjähdyksenvaarallisissa tiloissa käytettäviksi tarkoitettuja laitteita ja suojajärjestelmiä koskevan jäsenvaltioiden lainsäädännön yhdenmukaistamisesta)

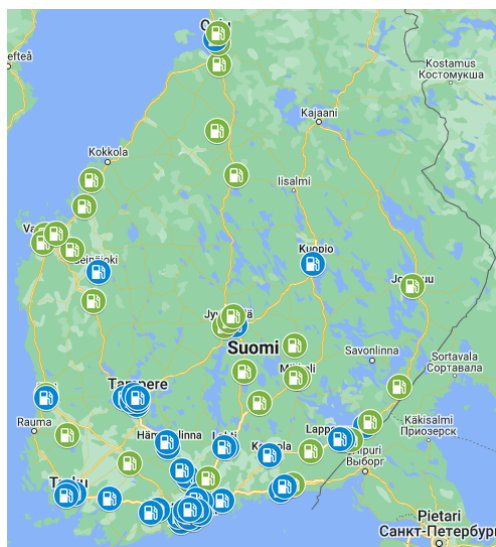
Energiakaasut luokitellaan kolmeen kaasuryhmään, joka on jakojäännös lämpöarvosta ja tiheydestä. Biometaani luokitellaan maakaasutyypin toiseen ryhmään ja sen alaluokkaan H. Kaasulaitteet jaetaan eri luokkiin, koska käytettävissä olevat kaasut ovat luokiteltu. Wobbe-indeksiä käyttämällä löydetään sopivat osat eri kaasuryhmille ilman, että tarvitsee muokata suuttimia tai paineensäätimiä. (Kaasuyhdistys, 2022) Wobbe-indeksin laskennasta enemmän osiossa 3 käytettävät laskelmat. Yleissääntönä pidetään 1 m<sup>3</sup> metaania vastaa 1 litraa polttoöljyä, joka taas on 10 kWh. Vastaavasti 1 kg metaania on noin 1,5 l bensaa, ajoneuvokäytössä. Kaasussa oktaani luku on 140, kun bensalla se on 95 – 98. Taulukko L 6.6, liite 6 ja sivu 432. (Lampinen, 2009) (Kaasuyhdistys, 2022)

Kaasuryhmät ja alaryhmät	Ylempi Wobbe-arvo, MJ/m <sub>3</sub> (lämpötila 15°C ja paine 1013,25 mbar)	
	Minimi	Maksimi
<b>Ensimmäinen kaasuryhmä</b> - alaryhmä a	22,4	24,8
<b>Toinen kaasuryhmä</b> - alaryhmä H - alaryhmä L - alaryhmä E	39,1 45,7 39,1 40,9	54,7 54,7 44,8 54,7
<b>Kolmas kaasuryhmä</b> - alaryhmä B/P - alaryhmä P - alaryhmä B	72,9 72,9 72,9 81,8	87,3 87,3 76,8 87,3

KUVA 16. Wobbe-indeksi (www.kaasuyhdistys.fi maakaasukäsikirja) (Kaasuyhdistys, 2022, s. 8)

## 6.1 Kaasutankkausasemat

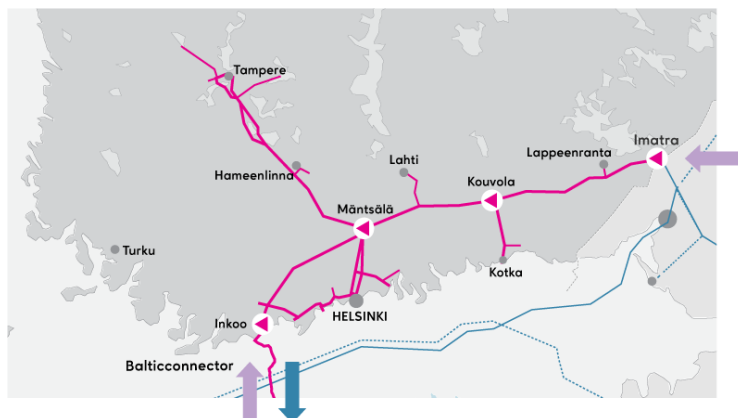
Tällä hetkellä Suomessa toimii 76 kaasutankkausasemaa ja 14 nesteytetyn kaasun asemaa. Gasum-asemilla on saatavilla sekä biokaasua että maakaasua. Puhtaasti biokaasua myyvät asemat ovat omia laitoksia. Suunnitteilla ja rakentumisvaiheessa olevia asemia on 44 kpl. Suunnitteilla olevat asemat, joissa tilanne avoin on 31 kpl. Kaasuautoilijat ry ylläpitää karttapalvelua, josta saa kattavaa tietoa kaasutankkausasemien tilanteesta ja tulevista kaasutankkausasemista. Sivustoilla on ladattavissa omaan puhelimeen Kaasulla.app, joka on karttapalvelu kaasutankkausasemille. Karttasivua on viimeksi päivitetty 28.10.2022. (Kaasuautoilijat, 2022)



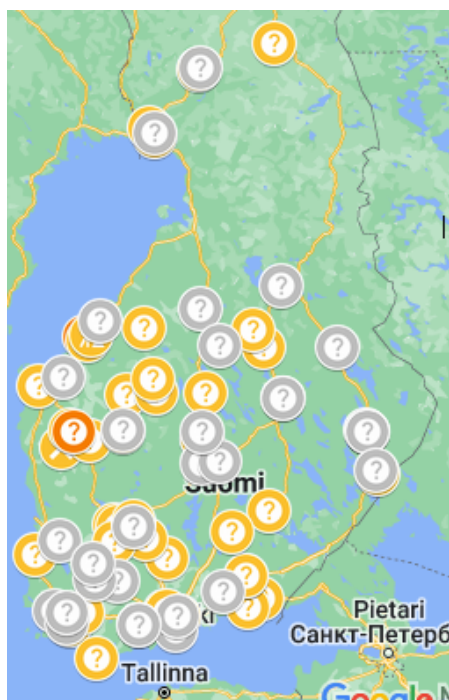
KUVA 17 Toiminnassa olevat kaasutankkausasemat (www.kaasuautoilijat.fi) <https://goo.gl/maps/r12iu6j7W8JYKHoyZ> (Kaasuautoilijat, 2022)

Karttakuvassa vihreät asemat tarjoavat biokaasua (CBG) ja sinisellä merkityiltä asemilta saa maakaasua (CNG) ja biokaasua. Kuvassa huomio kiinnittyy Pohjois-Savon, Kainuun ja Pohjois-Karjalan alueeseen, jossa ei ole tällä hetkellä kaasutankkausasemia. Kyseisiltä alueilta löytyy suurehkoja maatiloja sekä elintarviketeollisuutta, mutta toisaalta kuljetusetäisyydet ovat pitkiä, jolloin kustannukset kasvavat. Etelä-Suomen CBG/CNG -asemat selittyvät kaasuverkosta, joka on rakennettu

vuonna 1974 pahimman öljykriisin aikaan. Gasum ja Elerin As aloittivat hankkeen Baltic Connector -putken sekä LNG-terminaalien perustamiseksi Viroon ja Suomeen vuonna 2016 EU- rahoituksen varmistuttua. Balticconnector putken avajaisia vietettiin 11.12.2019. (Gasgrid, 2022)



KUVA 18. Kaasuputkiverkosto (<https://gasgrid.fi/kaasuverkosto/kaasun-siirtoverkosto/#siirtoverkosto>) viimeksi sivustolla käyty 10.11.2022



KUVA 19. Suunnitteilla olevat kaasutankkausasemat ja myös avoinna olevat.

<https://goo.gl/maps/r12iu6j7W8JYKHoy7> (Kaasuautoilijat, 2022)

Huomionarvoista kuvassa on kaasutankkausasemien lisääntyminen Joensuun ja Iisalmen välille ja Rovaniemen sekä Kemijärven asemat. Työ- ja elinkeinoministeriön biokaasuohjelmassa tavoitteena olisi saada paineistetulle liikennekaasulle tankkausasemia noin 150 km välein. (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2020, s. 28) Kaasuaseman voi tehdä myös siirtokonttien varaan, jos omalta alueelta ei saada tuotettua biokaasua. Kaasukonteista enemmän osiossa 5 Kaasun varastointi ja siirto. Harmaalla merkityt ovat avoimessa tilanteessa olevia hankkeita ja keltaiset ovat rakenteilla tai luvan saaneita. (Kaasuautoilijat, 2022)

## 6.2 Kaasutankkausasema ja kaasun tankkaaminen

Toimivan kaasutankkausaseman perustamisessa täytyy ottaa huomioon turvallisuus, tekniset ominaisuudet ja kaasun varastointi. Kaasua voidaan tuoda asemalle kolmella eri tavalla: biokaasulaitoksesta putkikaasuna, paineistettuna siirtokonteissa tai nesteytettynä kaasuna LNG-terminaalin kautta. Kaasutankkaus jaotellaan nopeaan ja hitaaseen tankkaukseen. Esimerkiksi biokaasulla toimivat busit tankataan varikolla hitaalla tankkauksella, joka voi kestää koko yön. Nopeat tankkausasemat toimivat muutamissa minuuteissa ja ovat yleisesti käytössä henkilö- ja tavaraliikenteessä.

(Kaasuyhdistys, 2022) Kuvassa 23 on selkeästi esitetty eri asematyypit. Kuva on peräisin Kaasuyhdistyksen Suunnitteluohje maa- ja biokaasun tankkausasemille. Kaasutankkausasemalla pitää olla myös käyttö- ja kunnossapitosuunnitelma sekä nimetty ja koulutettu henkilökunta niitä varten. Eri-tyisen suotavaa olisi perehdyttää pelastuslaitos aseman kriittisiin kohteisiin. Kaasun tankkaaminen on tehty tavalliselle kuluttajalle todella helpoksi. Paineistetun kaasun ja nesteytetyn kaasun tankkausliittimet ovat erilaiset, jolloin erehtymisen mahdollisuutta ei käytännössä ole. LNG/LBG on tarkoitettu raskaalle liikenteelle ja CNG/CBG henkilöautoille ja kevyttavaran kuljetukseen. Kaasuauton tankkaaminen on helppoa ja ei juurikaan eroa nestemäisten polttoaineiden tankkaamisesta. Kaasuautot käyttävät bi-fuel -tekniikkaa, jossa kaasua on pääpolttoaine ja bensatankki on hätävarana. Dieselmoottori on muokattavissa kaasukäyttöiseksi, jota kutsutaan dual-fuel -tekniikaksi. Kaasua ja poltonesteitä tankataan eri suureiden mukaan. Poltonesteitä tilavuutena eli litroina ja kaasua massoina eli kilogrammoissa. Kuvassa 18 on bi-fuel -tekniikkaa käyttävän auton tankkausluukku. Isompi korkki on nestemäiselle polttoaineelle ja pienempi kaasulle. Kuvassa 19 on yksityiskohtaisempi kuva kaasutankkaus venttiilistä. (Lampinen, 2009, ss. 235-237) (Jäkäläniemi, 2019) (Ritva Impola, 2020, s. 17)



KUVA 20. Kaasun ja nestemäisen polttoaineen tankkaus. (<https://kaasuautoilijat.fi/2019/07/22/artikkeli-ajankohtaista/>) alkuperäinen kuva on Seuralehden artikkelista "Kaasuautot kulkevat 90 prosenttisesti biokaasulla", jonka on kirjoittanut Jukka Hiiri.

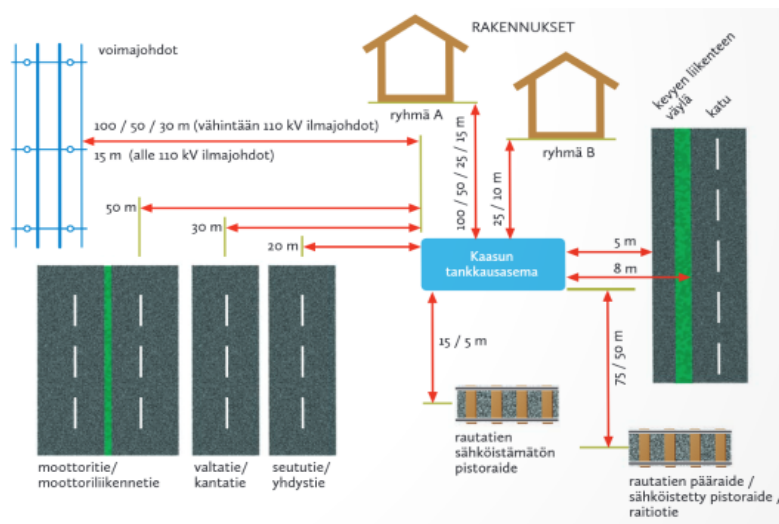


KUVA 21. Tankkausventtiili (Jäkäläniemi, 2019)

Kaasun tankkaaminen eroaa polttonesteistä siten, että kaasupistooli lukitaan venttiiliin kiinni ja mitaristosta painetaan käynnistystä. Kaasua virtaa tarvittava kilo määrä kaasupulloon/-pulloihin ja niiden täytyttyä virtaus katkeaa automaattisesti. Tankkaajan ei siis tarvitse pitää kiinni pistolista. Tästä on seurannut tankkausasemille ongelmia, kun tankkauksen valmistumista on menty autoon sisälle odottamaan ja sitten on lähdetty liikenteeseen irrottamatta kaasupistoolia. (Ritva Impola, 2020)

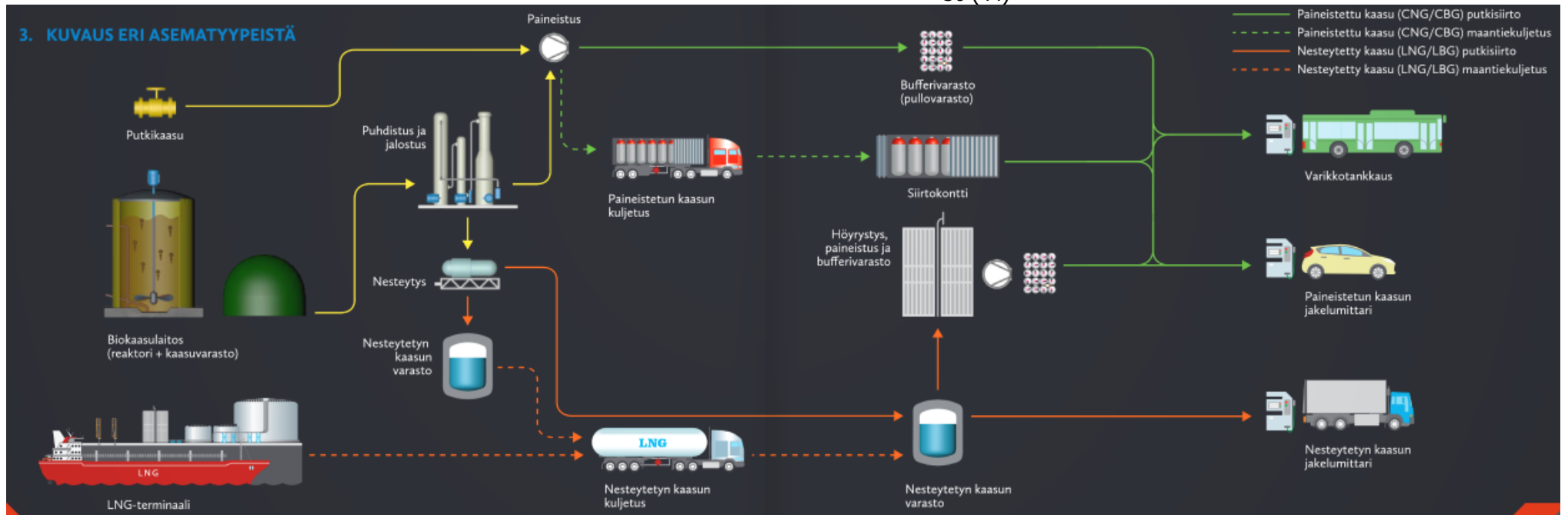
### 6.3 Turvavyöhykkeet

Kaasutankkausasema sisältää yleensä paineenkorotusjärjestelmän, jossa putkistossa virtaava kaasu korotetaan 8 bar:sta > 250 bar:iin. Paineistettu kaasu johdetaan kiinteästi rakennettuun varastoon eli bufferivarastoon, joka on konttiin rakennettu pullovarasto ja pullot ovat asennettu sarjaan. Bufferivarastosta kaasu johdetaan jakeluasemalle, joka samalla 250 bar paineella jakaa kaasun autossa olevaan kaasutankkiin. (Kaasuyhdistys, 2022) Koska kaasua käsitellään korkeassa paineessa ja on myös räjähdysvaara, on tankkausaseman turvallisuuteen kiinnitettävä erityistä huomiota. Kaasutankkausaseman läheisyydessä olevat rakennukset kartoitetaan ja jaotellaan luokkiin ryhmä A, joka kattaa kokoontumiseen tarkoitettut rakennukset (esimerkiksi hotellit, suurmyymälät, sairaalat, koulut). Lisäksi tähän ryhmään kuuluvat myös asuinkerrostalot ja teollisuustilat, joissa käsitellään tai varastoidaan räjähtäviä aineita tai vaarallisia kemikaaleja, pois lukien liikennepolttonesteitä myyvät jakeluasemat. Ryhmään B kuuluvat asuinhuoneistot, työpaikahuoneistot ja muut kuin asumiseen tarkoitetut huoneistot sekä niiden läheisyydessä olevat leikkikentät ja muut alueet, joissa ihmisiä liikkuu. Tähän ryhmään lasketaan myös tankkausasemat sekä niiden jakeluasemarakennukset ja niihin liittyvät alueet. Määräykset tulevat maakaasusetuksesta. Rakennusten lisäksi pitää huomioida liikenneväylät ja voimajohdot. Kuvassa 20 on esitelty vähimmäisetäisyydet ulkopuolisille kohteille. (Kaasuyhdistys, 2022, ss. 12-19)



KUVA 22. Suojaetäisyydet (<https://www.kaasuyhdistys.fi/julkaisut/suunnitteluohje-maa-ja-biokaasun-tankkausasemille/>) (Kaasuyhdistys, 2022, s. 19)

Suojamuureilla, joiden paloluokka on vähintään EI 120, voidaan tapauskohtaisesti lyhentää suojaetäisyyksiä jakeluasemien suoja- ja muihin rakennuksiin sekä pysäköintipaikkoihin. Siirtokontit ja niiden sijainti määritetään tapauskohtaisesti, mutta etäisyys muihin kohteisiin vaihtelee 10 – 20 metrin välillä. Suojamuurilla etäisyyksiä voidaan lyhentää. (Kaasuyhdistys, 2022)



KUVA 23. Kaasuyhdistyksen kuvaus eri asematyypeistä. (Kaasuyhdistys, 2022, ss. 6-7)

7 JOUTSAN EKOKAASU OY EI JULKINEN

## 8 POHDINTA

Tätä työtä varten tutustuin tämänhetkiseen tilanteeseen biokaasun tuotannossa ja sen mahdollisuuksiin huoltovarmuuden, energiaomavaraisuuden ja vaihtoehtoisen liikennepolttoaineen käytössä. Biokaasusektorilla on käynnissä useampia hankkeita ympäri Suomen ja kilpailu orgaanisista jätteistä on kovaa.

Vain tilaajan käyttöön.

Opinnäytetyön alkuosassa on kerrottu biokaasuntuotantoon liittyvistä prosessista, komponenteista, turvallisuudesta ja käyttökohteista. Tällä osiolla syvensin omaa ymmärrystäni biokaasusta. Toiveenani on, että myös tätä työtä lukeva saisi käsityksen siitä, miten monimutkaisesta prosessista on kyse ja mitä kaikkea biokaasulaitosyrittäjä joutuu ottamaan huomioon. Biokaasuala on uusiutuvan energian ja kiertotalouden ytimessä. Laitoksen suunnittelussa pitää ottaa huomioon monta eri asiaa alkaen syötteiden saatavuudesta niiden kestävyyskriteereihin. Laitoksen suunnittelussa kiinnitin erityisesti huomiota lämmöneristykseen, sillä lämpöhäviöt lisäävät laitoksen omaa energian käyttöä ja se on silloin pois korkeamman lisäarvon tuotteesta. Prosessin käynnistyttyä pitää ottaa huomioon lopputuotteiden käyttö: kaasun myynti ulkopuolelle, omaan käyttöön vai liikennepolttoaineeksi ja mädätysjäätännöksen hyödyntäminen: investoitko vielä kierrätyslannoitteiden valmistukseen vai myytkö lietteenä eteenpäin. Kaikilla näillä päätöksillä on hinta, ja kaikille tuotteille on olemassa loppukäyttäjät. Näitä samoja teemoja käsiteltiin myös biokaasuun liittyvissä webinaareissa eri puolella Suomea.

Biokaasualan jatkotutkimuksia ajatellen olisi hyvä selvittää haitallisten vieraskasvilajien siemenien tuhoutuminen mädätysprosessissa. Marjaana Hassani Jyväskylän yliopiston bio- ja ympäristötieteidenlaitokselta on tehnyt koetutkimuksen Lupiinilajikkeiden siementen hajoavuudesta. (Marjaana, 2021). Lisätutkimuksia tarvittaisiin Armenianjättiputken (*Heracleum sosnowskyi*), Kaukasianjättiputken (*Heracleum mantegazzianum*), Persianjättiputken (*Heracleum persicum*) ja Jättipalsamin (*Impatiens glandulifera*) osalta. Rakennusteknisesti voisi tutkia eristeiden optimointia ja uusien eritysmateriaalien käyttöä biokaasulaitoksilla. Lisäksi syötteiden saatavuudesta eri toimialoilta ja niiden helpomasta ilmoittamisesta biokaasulaitoksille sekä logistiikkasta olisi hyvä tehdä lisää kartoitusta ja optimointia.

## LÄHTEET

1. Puhelinkeskustelu Outi Pakarisen kanssa. Tutkimus- ja projektikoordinaattori Jyväskylän yliopisto.
2. Luostarinen Sari 2013 Biokaasuteknologiaa maataloilla 1 Biokaasulaitoksen hankinta, käyttöönotto ja operointi – käytännön kokemuksia MTT:n maatalakohtaiselta laitokselta MTT raportti 113  
<https://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/481263/mttraportti113.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
3. Maritta Kymäläinen ja Outi Pakarinen 2015 Biokaasuteknologia Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen KIRJA  
[https://issuu.com/hamkuas/docs/hamk\\_biokaasun\\_tuotanto\\_2015\\_ekirja](https://issuu.com/hamkuas/docs/hamk_biokaasun_tuotanto_2015_ekirja)
4. Saija Rasi, Jukka Markkanen, Ville Pyykkönen, Kalle Aro, Ari-Matti Seppänen, Olli Niskanen, Seppo Mönkkönen, Miika Kahelin ja Sari Luostarinen: Kohti biokaasun liikennekäyttöä Pohjois-Savossa FarmGas-PS 2 -hankkeen raportti hajautetusta biokaasuntuotannosta.  
[https://issuu.com/savogrow/docs/biokaasulla\\_liikkeelle\\_loppuraportti\\_issuu](https://issuu.com/savogrow/docs/biokaasulla_liikkeelle_loppuraportti_issuu) (vierailtu 30.8.2022)
5. Laki biopolttoaineista ja bionesteistä 393/2013. [www.finlex.fi](http://www.finlex.fi)
6. Annimari Lehtomäki: Biogas Production from Energy Crops and Crop Residues (2006)  
<https://jyx.jyu.fi/bitstream/handle/123456789/13152/9513925595.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
7. Sanna Marttinen, Kimmo Suominen, Marja Lehto, Taina Jalava, Elina Tampio: Haitallisten orgaanisten yhdisteiden ja lääkeaineiden esiintyminen biokaasulaitosten käsittelyjäännöksissä sekä niiden elintarvikeketjuun aiheuttaman vaaran arviointi (2014)  
<http://www.mtt.fi/mttraportti/pdf/mttraportti135.pdf>
8. Teodorita Al Seadi, Dominik Rutz, Heinz Prassl, Michael Köttner, Tobias Finsterwalder, Silke Volk, Rainer Janssen: Biogas Handbook (2008)  
<https://www.lemvigbiogas.com/BiogasHandbook.pdf>
9. Markus Latvala: Paras käytettävissä oleva tekniikka (BAT) Biokaasuntuotanto suomalaisessa toimintaympäristössä (2009)  
[https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/37998/SY\\_24\\_2009.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/37998/SY_24_2009.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
10. Ville Pyykkönen, Saija Rasi ja Elina Virkkunen: Biokaasulaitoksen hankinta ja tarjouspyyntö (2018)  
[https://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/543255/luke-luobio\\_60\\_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/543255/luke-luobio_60_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
11. Koponen, K., & Sokka, L.: REDII -direktiivi: Kasvihuonekaasupäästövähennemää koskevat kestävyyskriteerit (2019)  
[https://cris.vtt.fi/ws/portalfiles/portal/26329817/REDII\\_raportti\\_p\\_ivitys\\_final.pdf](https://cris.vtt.fi/ws/portalfiles/portal/26329817/REDII_raportti_p_ivitys_final.pdf)

12. Työ- ja elinkeinoministeriö, maa- ja metsätalousministeriö, ympäristöministeriö, liikenne- ja viestintäministeriö ja valtiovarainministeriö: Biokaasuohjelmaa valmisteleavan työryhmän loppuraportti  
[https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/162032/TEM\\_2020\\_3\\_Biokaasuohjelmaa%20valmisteleavan%20tyoryhman%20loppur%20.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/162032/TEM_2020_3_Biokaasuohjelmaa%20valmisteleavan%20tyoryhman%20loppur%20.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
13. Kaasuyhdistyksen verkkojulkaisu: Biokaasun, biometaanin ja nestemäisen biometaanin (LBG) tuotantoon ja jatkokäsittelyyn liittyvät kaasuturvallisuusasiat  
<https://www.kaasuyhdistys.fi/julkaisut/biokaasun-turvallisuusohje/>
14. Buswel A.M. Anaerobic Fermentation BULLETIN NO. 32  
<https://www.isws.illinois.edu/pubdoc/B/ISWSB-32.pdf>
15. Ferrari G, Holl E, Steinbrenner J, Pezzuolo A, Lemmer A (2022): Environmental assessment of a two-stage high pressure anaerobic digestion process and biological upgrading as alternative processes for biomethane production  
<https://www.sciencedirect-com.ezproxy.savonia.fi/science/article/pii/S0960852422009415>
16. H.B. Moller, S.G. Sommer, B.K. Ahring (2003): Methane productivity of manure, straw and solid fractions of manure  
<https://www.sciencedirect-com.ezproxy.savonia.fi/science/article/pii/S0961953403001569>
17. Pro Gradu-tutkielma, Saana Ahonen: Alueellinen liikennebiokaasun tuotanto, siirto ja jakelu esimerkkitaipauksena Keski-Suomen maakunta. 22.7.2010  
<https://jyx.jyu.fi/bitstream/handle/123456789/24851/1/URN%3ANBN%3Afi%3Aju-201008122457.pdf>
18. Nina Liljeblad: Biokaasun jalostus ja käyttö (2017)  
<http://jultika.oulu.fi/files/nbnfioulu-201702251286.pdf>
19. <https://www.sarlin.com/tuote/greenlane-biogas-jarjestelma-puhdistaa-jalostaa-biokaasun/>
20. Verkkojulkaisu Kaasuyhdistys ry: Maakaasu käsikirja  
<https://www.kaasuyhdistys.fi/julkaisut/maakaasun-kasikirja/>
21. Mikko Ahokas Macon Oy diasarja  
[https://www.oamk.fi/images/Hankkeet/KASVU/arvoketjujen\\_kuvaus\\_esitys\\_korjattu\\_mikko\\_20062022.pdf](https://www.oamk.fi/images/Hankkeet/KASVU/arvoketjujen_kuvaus_esitys_korjattu_mikko_20062022.pdf)
22. <https://jyx.jyu.fi/bitstream/handle/123456789/24851/1/URN%3ANBN%3Afi%3Aju-201008122457.pdf>
23. <https://www.bright-renewables.com/technology-biogas-upgrading/>
24. Direktiivi 2014/34/EU räjähdyksvaarallisissa tiloissa käytettäviksi tarkoitettuja laitteita ja suo-jajärjestelmiä koskevan jäsenvaltioiden lainsäädännön yhdenmukaistamisesta  
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014L0034&from=sk>
25. <https://www.sis.se/apihttps://www.sis.se/api/document/preview/18918//document/preview/18918/>

26. <https://gasgrid.fi/>
27. Pohjois-Karjalan ammattikorkeakoulun julkaisu B: 17. Ari Lampinen: Uusiutuvan liikenne-energian tiekartta 2009  
[https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/127014/B17\\_Lampinen\\_verkkoversio\\_suojattu.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/127014/B17_Lampinen_verkkoversio_suojattu.pdf?sequence=1&isAllowed=y) (Viimeksi käyty 17.11.2022)
28. Joutsan teknisenlautakunnan myöntämä ympäristölupa  
<https://docplayer.fi/1816963-Joutsan-ekokaasu-oy-n-ymparistolupahakemus-biokaasulaitos.html>
29. Söderena, P., Suomalainen, M., Kajolinna, T., & Melin, K. (2019): Biometaanin välivarastointi ja varastointi ajoneuvoissa  
[https://cris.vtt.fi/ws/portalfiles/portal/26400504/Biometaanin\\_v\\_livarastointi\\_ja\\_varastointi\\_ajoneuvossa\\_Tulevaisuuden\\_mahdollisuudet.pdf](https://cris.vtt.fi/ws/portalfiles/portal/26400504/Biometaanin_v_livarastointi_ja_varastointi_ajoneuvossa_Tulevaisuuden_mahdollisuudet.pdf)
30. Opinnäytetyö Jäkäläniemi Jere:  
[https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/267490/Jakalaniemi\\_Jere.pdf?sequence=2](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/267490/Jakalaniemi_Jere.pdf?sequence=2)
31. Artikkelin Marjaana Hassani: Risk of Invasive *Lupinus polyphyllus* Seed Survival in Biomass Treatment Processes  
<https://doi.org/10.3390/d13060264>



## LIITE 2: KORJATTU YLEISKAAVIO (VAIN TILAAJALLE)

LIITE 3: LUONNONVARAKESKUKSEN BIOKAASULASKURI (VAIN TILAAJALLE)  
(LUONNONVARAKESKUS, 2022)