



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

# **BIOKAASUALAN YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET JA NIIDEN HALLINTA**

Venni Sulku

Ympäristötekniikka

Kandidaatintyö

Kesäkuu 2023

# TIIVISTELMÄ

Biokaasualan ympäristövaikutukset ja niiden hallinta

Venni Sulku

Oulun yliopisto, Prosessi- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö 2023, 37 s.

Työn ohjaaja yliopistolla: TkT Jenni Ylä-Mella

Biokaasu omaa suurta potentiaalia korvaamaan uusiutumattomia polttoaineita sekä energiatuotannossa että myös liikenteessä lukuisien ympäristöetujensa vuoksi. Biokaasualue pitää kuitenkin sisällään myös riskejä sekä ympäristön, että myös ihmisten terveydelle. Tämän kandidaatintyön tarkoituksena on keskittyä biokaasualan haitallisiin ympäristövaikutuksiin sekä löytää keinoja niiden ehkäisemiselle. Tarkastelussa on biokaasun koko elinkaari aina syöteaineiden lähteistä niiden esikäsittelyyn, itse tuotantoprosessiin sekä lopullisten tuotteiden käyttöön, käsittelyyn ja varastointiin. Työssä käydään läpi yleiskattavasti lainsäädännön roolia ympäristövaikutusten säätelyssä, yleisimpiä biokaasuprosesseja, sekä prosesseille tyypillisiä syötteitä ja niiden vaikutuksia lopullisten tuotteiden koostumukseen ja niissä piileviin riskeihin.

Työn pohjalta tehtyjen johtopäätöksiensä perusteella voidaan sanoa, että biokaasualan ympäristövaikutusten ja niiden hallintamenetelmien arviointia tehdessä elinkaariajattelu on merkittävässä roolissa. Sen lisäksi, että syötteissä esiintyvät epäpuhtaudet ja riskitekijät vaikeuttavat itse tuotantoprosessia, ovat ne läsnä myös lopullisissa tuotteissa. Syötejakeiden ominaisuuksien sekä niissä läsnä olevien riskien tunnistaminen on elintärkeää, jotta ne voidaan esikäsittää vaadittavia menetelmiä käyttäen sekä prosessit voidaan suunnitella syötejakeiden mukaan oikeaoppisesti. Myös lainsäädännön rooli on suuressa osassa haitallisen ympäristökuormituksen minimoimiseksi ja biokaasualan positiivisten vaikutusten tehostamiseksi.

*Avainsanat: biokaasu, mädätys, orgaaninen aines, kiertotalous*

# ABSTRACT

Environmental impacts of the biogas sector and their management

Venni Sulku

University of Oulu, Degree Programme of Process and Environmental Engineering

Bachelor's thesis 2023, 37 pp.

Supervisor at the university: D.Sc.(Tech.) Jenni Ylä-Mella

Biogas serves great potential in replacing non-renewable fuels in both energy production and transportation due to its numerous environmental advantages. However, the biogas industry also possesses risks to both the environment and the human health. The purpose of this bachelor's thesis is to focus on the harmful environmental impacts of the biogas industry and find ways to prevent them. The analysis covers the entire life cycle of biogas, from the sources of the feedstocks to their preprocessing, the production process, and the utilization, treatment, and storage of the final products. This thesis provides a comprehensive overview on the role of legislation in regulating environmental impacts, the most common biogas processes, as well as the typical feedstocks used in these processes and their effects on the composition of the final products and their associated risks.

Based on the conclusions drawn from this work, it can be stated that life cycle thinking plays a significant role in assessing the environmental impacts of the biogas industry and its management methods. In addition to making the production process more challenging, impurities and risk factors present in the feedstocks also exist in the final products. Recognizing the characteristics of the feedstocks and the risks associated with them is crucial in order to preprocess them using the necessary methods and design the processes appropriately according to the feedstocks. The role of legislation is also essential in minimizing the harmful environmental strain and maximizing the positive effects of the biogas industry.

*Keywords: biogas, anaerobic digestion, organic matter, circular economy*

# SANASTOA

Biokaasu = Biokaasulaitoksessa eli hallituissa olosuhteissa syntyvää kaasuseosta ennen sen puhdistusta tai muuta jatkojalostusta (Biovoima, 2019a)

Biometaani = Biokaasu, josta on poistettu suurin osa muista kaasuista kuin metaanista (Biovoima, 2019a)

Mikrosaaste = Aine, joka on pieninäkin pitoisuuksina ympäristöongelma (Tieteen termipankki, 2014a)

Mikromuovi = Pieni, alle 5 millimetrin kokoinen muovikappale (Euroopan parlamentti, 2018)

Raskasmetalli = Ympäristölle haitallinen, molekyylipainoltaan raskas metalli (Tieteen termipankki, 2014b)

VOC-yhdiste = Haihtuva orgaaninen yhdiste, jonka kiehumispiste normaali-ilmanpaineessa 101,3 kPa mitattuna on enintään 250 °C (Tukes, 2023a)

Pistekuormitus = Vesistökuormitus, joka on lähtöisin pistemäisistä päästölähteistä, joita voidaan mitata (Vesi.fi, 2022)

Hajakuormitus = Vesistökuormitus, joka on lähtöisin useista pienistä päästölähteistä, joita ei voida mitata tarkasti (Vesi.fi, 2022)

# SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO

SANASTOA

1 JOHDANTO .....	6
2 BIOKAASU ENERGIANLÄHTEENÄ .....	7
2.1 Anaerobinen hajoaminen .....	7
2.2 Biokaasun hyödyntäminen ja nykyinen tilanne .....	9
3 LAINSÄÄDÄNNÖLLINEN VIITEKEHYS.....	11
3.1 Biopolttoaineisiin ja niiden käyttöön liittyvä lainsäädäntö .....	11
3.2 Ympäristövaikutusten arviointimenettely .....	13
3.3 Materiaalivirtojen käsittelyä ja tuotantoprosessia koskeva lainsäädäntö .....	14
4 BIOKAASUPROSESSI JA SEN MATERIAALIVIRRAT .....	17
4.1 Syötteet.....	17
4.1.1 Yhdyskuntien biojäte ja teollisuuden sivuvirrat .....	17
4.1.2 Maatalouden orgaaninen jäte .....	18
4.1.3 Puhdistamoliete.....	19
4.2 Biokaasun tuotantoprosessit.....	19
4.3 Tuotteet .....	20
4.3.1 Biokaasuseos.....	20
4.3.2 Mädätysjäännös .....	21
5 YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET JA NIIDEN HALLINTA .....	23
5.1 Mädätysjäännös.....	23
5.1.1 Patogeenit .....	23
5.1.2 Mikromuovit ja raskasmetallit .....	24
5.1.3 Mädätysjäännöksen kaasupäästöt .....	24
5.2 Tuotantoprosessin kaasupäästöt ja laitosturvallisuus .....	25
5.3 Hule- ja jätevedet .....	26
5.4 Haju- ja melupäästöt .....	27
5.5 Ravinnesaasteet .....	27
6 POHDINTA .....	29
LÄHDELUETTELO.....	31

# 1 JOHDANTO

Ilmastonmuutoksen hidastaminen ja pysäyttäminen on ollut jo useita vuosia niin kansainvälisenä kuin kansallisena agendana. Euroopan parlamentti on asettanut hiilineutraaliustavoitteen vuoteen 2050 mennessä, johon myös Suomi on sitoutunut aikaistaen prosessia jo vuoteen 2035. Näiden tavoitteiden toteuttaminen vaatii sekä poliittisia että konkreettisia toimenpiteitä jokaisella mahdollisella sektorilla. (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2022)

Biokaasuala on noussut viime vuosina merkittävään rooliin vastaamaan ilmastonmuutoksen tuomiin haasteisiin niin energiantuotannossa kuin myös liikennepolttoaineena sen tuotannon ja käytön tarjotessa lukuisia ympäristöetuja. Biokaasuprosessi käyttää syötteenään orgaanista massaa, eli kyseessä on uusiutuva energialähde, joka omaa suuren potentiaalin korvaamaan fossiilisia polttoaineita. Sen lisäksi, että biokaasun on tutkittu laskevan polttoaineen elinkaaren kasvihuonepäästöjä peräti 90 %:lla (Gasum, 2023), mahdollistaa se luonnollisesti syntyvän haitalliseksi kasvihuonekaasuksi luokitellun metaanin talteenoton ja hyödyntämisen energianlähteenä sekä orgaanisen aineksen sisältämien ravinteiden kierrättämisen lannoitteena.

Lukuisista ympäristön kannalta positiivisista tekijöistään huolimatta, myös biokaasualan kohdistuu sekä ympäristön että ihmisten terveyden kannalta merkittäviä riskitekijöitä. Turvallisen ja kestävä biokaasun tuottamiseksi vaaditaan näiden riskien tunnistamista, ja niihin reagoimista sekä poliittisin, että myös tuotantoteknisin keinoin.

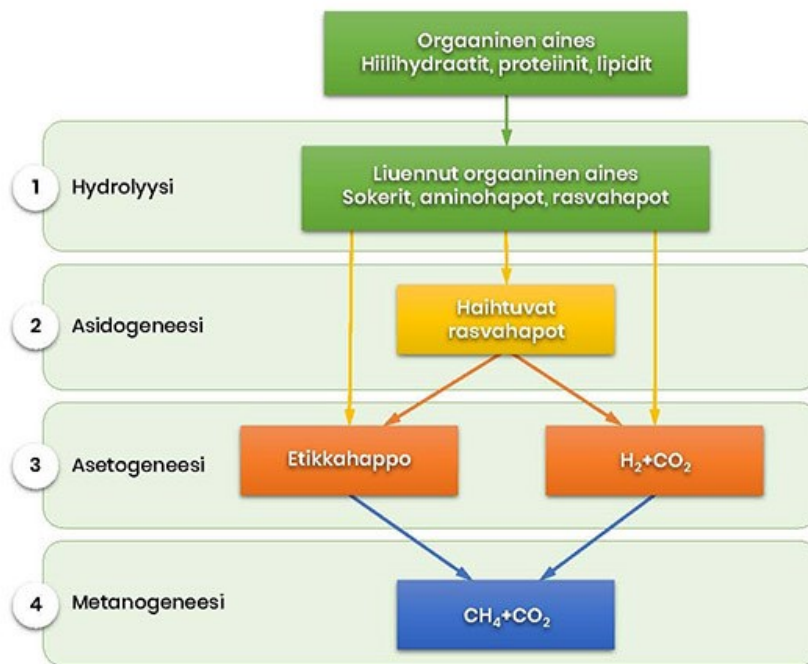
## 2 BIOKAASU ENERGIANLÄHTEENÄ

Biokaasulla tarkoitetaan kaasuseosta, jota syntyy orgaanisen aineksen mädätessä hapettomissa olosuhteissa. Kaasuseos sisältää syöteaineesta riippuen 50–70 % metaania, lopun ollessa pääosin hiilidioksidia sekä pieniä määriä vetyä, typpeä sekä erinäisiä rikkiyhdisteitä. Biokaasua voi muodostua luonnollisesti hapettomissa tiloissa esimerkiksi kaatopaikoilla sekä järvien ja soiden pohjasedimenteissä, mutta biokaasulaitoksen avulla voidaan tehokkaasti hyödyntää laitokselle tyypilliset orgaaniset syöteaineet, kuten kotitalouksien ja teollisuuden biojätteet sekä orgaaniset sivuvirrat, maatalouden orgaaniset jätteet sekä vesihuoltolaitosten jätevesilietteet. (Biovoima, 2019a)

Yleisesti ottaen biokaasulaitoksen toiminta pohjautuu tiettyihin pääprosessivaiheisiin mittakaavasta riippumatta. Syötteet esikäsitellään ja esivarastoidaan, josta ne siirretään biokaasureaktoreihin mädätykseen. Syntynyt mädätysjäännös varastoidaan tilapäisesti, josta se kuljetetaan joko jatkokäyttöä varten tai lopulliseen varastoon odottamaan jatkokäyttöä. (Luostarinen, 2015 s. 82)

### 2.1 Anaerobinen hajoaminen

Tuotantoprosessin tavoitteena on muuttaa syöteaineessa olevat ravintoaineet; proteiinit, hiilihydraatit sekä rasvat lopullisiksi tuotteiksi, eli metaaniksi ja hiilidioksidiksi. Tätä prosessia kutsutaan anaerobiseksi hajoamiseksi. Se tapahtuu useiden eri välituotteiden kautta, ja voidaan yksinkertaistettuna jakaa neljään eri vaiheeseen (Kuva 1): hydrolyysiin, asidogeneesiin, asetogeneesiin sekä metanogeneesiin, joista kukin vaihe perustuu eri pieneliöryhmän toimintaan. (Motiva, 2013)



Kuva 1. Anaerobisen metaanituottoprosessin vaiheet (Biovoima, 2019b).

Hydrolyysissä orgaanisen aineksen ulkopuoleiset mikro-organismien entsyymit hajottavat hiilihydraattien, proteiinien sekä lipidien kompleksit pitkät ketjut lyhyemmiksi ja yksinkertaisemmiksi monomeereiksi, kuten sokereiksi sekä amino- ja rasvahapoiksi. Asidogeenisissä yhdisteet jatkavat hajoamista asidogeenisten bakteerien toimesta muodostaen haihtuvia rasvahappoja, mukaan lukien ammoniakkia, hiilidioksidia, vetysulfiittia sekä muita sivutuotteita. Kolmannessa vaiheessa eli asetogeenisissä edellisen vaiheen yksinkertaisemmat yhdisteet hajoavat edelleen tuottaen pääosin etikkahappoa sekä sivutuotteina hiilidioksidia ja vetyä. Viimeisessä vaiheessa eli metanogeenisissä metaania tuottavat bakteerit hajottavat joko etikkahappoa muodostaen metaania ja hiilidioksidia, tai vetyä sekä hiilidioksidia muodostaen metaania ja vettä. (Speight, 2019, s. 76–80)

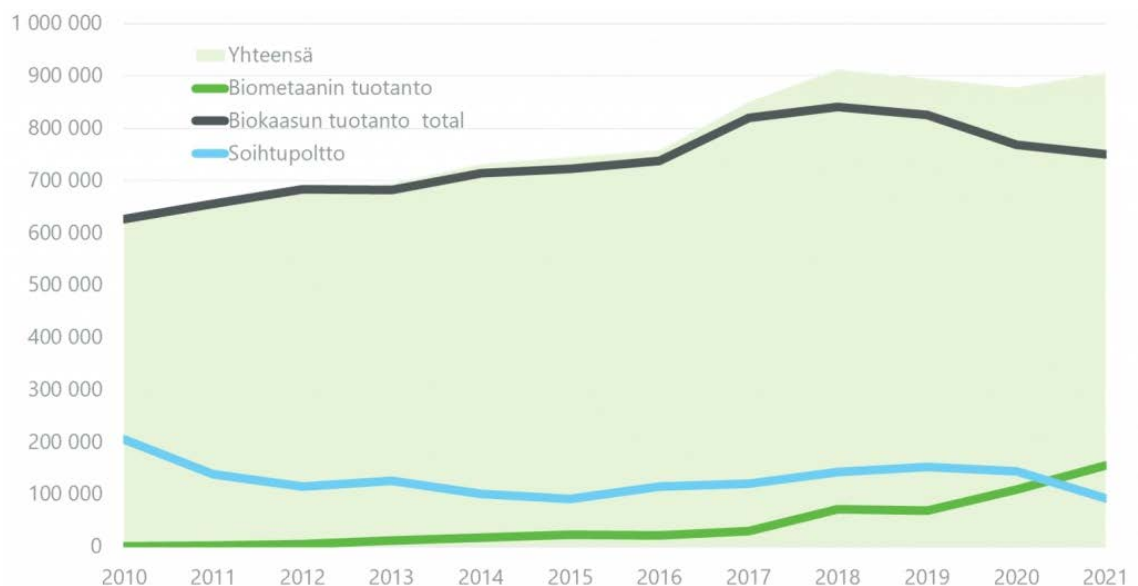


## 2.2 Biokaasun hyödyntäminen ja nykyinen tilanne

Suoraan biokaasuprosessista saatu raakakaasu sisältää suurissa määrin energiaa, ja sitä voidaan käyttää sellaisenaan lämmön- ja sähköntuotannossa. Tarvittaessa kaasun voi jalostaa myös biometaaniksi poistamalla siitä hiilidioksidi sekä muut epäpuhtaudet, jolloin sitä voidaan käyttää myös polttoaineena liikenteessä. Jalostettu biokaasu vastaa käytännössä kemiallisilta ominaisuuksiltaan jalostettua maakaasua, minkä vuoksi sitä voidaan käyttää maakaasun tavoin ajoneuvoissa, energianlähteenä sekä kuljettaa ja varastoida kaasuverkossa. (Suomen Biokierto ja Biokaasu ry, 2023a)

Biokaasun lisäksi prosessissa syntyy sivutuotteena kiinteää mädätysjäännöstä. Mädätysjäännös pitää sisällään samat ravinteet mitä prosessiin on syötetty, minkä vuoksi se soveltuu hyvin maatalouteen lannoitteeksi tai maanparannusaineeksi. Näin saadaan ravinteet hyötykäyttöön sekä korvattua hiilijalanjäljeltään suuremmat mineraalilannoitteet uusiutuvalla vaihtoehdolla. (Suomen Biokierto ja Biokaasu ry, 2023b)

Suomessa vuonna 2021 tuotettiin noin 156 GWh biometaania ja noin 750 GWh biokaasua (Kuva 2).



Kuva 2. Biokaasun ja biometaanin tuotannon kehitys vuosina 2010–2021 (MWh) (Suomen Biokierto ja Biokaasu ry, 2023c).

Kuvasta 2 havaitaan, että vuosina 2018–2020 tapahtui notkahdus biokaasun tuotannossa, joskin biometaanin määrä kasvoi vähäpäästöisten polttoaineiden kysynnän lisääntyessä. Vuonna 2021 liikennebiokaasun osuus oli noin 15 prosenttia biokaasun ja -metaanin käytöstä, noin 50 prosentin mennessä lämmön- ja sähköntuotantoon (Suomen Biokierto ja Biokaasu ry, 2023c).

### **3 LAINSÄÄDÄNNÖLLINEN VIITEKEHYS**

Biokaasualaa käsittelevällä lainsäädännöllä pyritään hallitsemaan ja ehkäisemään siitä koituvia negatiivisia ympäristövaikutuksia, edistämään biopolttoaineiden käyttöä ja saatavuutta liikenteessä sekä ohjaamaan kohti puhtaampaa energiantuotantoa ja vihreää siirtymää. Biokaasualaa käsittelevät merkittävimmät lait ja asetukset liittyvät biopolttoaineiden käyttöön ja saatavuuteen, tuotantoprosessiin, syötteiden ja tuotteiden käsittelyyn sekä ympäristövaikutusten arviointiin.

#### **3.1 Biopolttoaineisiin ja niiden käyttöön liittyvä lainsäädäntö**

Biopohjaisille polttoaineille asetetut vaatimukset pohjautuvat pitkälti lakiin biopolttoaineista, bionesteistä ja biomassapolttoaineista (393/2013). Laki esittää luvussa 2 vaadittavat kestävyyskriteerit, jotka biopohjaisten polttoaineiden tuotannossa käytettävien raaka-aineiden on täytettävä.

Luvun 2 momentissa 6 § määrittellään kasvihuonepäästövähennys, jonka mukaan biopolttoaineen, liikennealalla kulutetun biokaasun ja bionesteen elinkaaren aikaisten kasvihuonekaasupäästöjen on oltava vähintään 50–65 prosenttiyksikköä pienemmät sitä korvaavan fossiilisen polttoaineen päästöistä. Biomassapolttoaineesta tuotetun sähkön sekä lämmitys- ja jäähdytysenergian puolestaan tulee olla vähintään 70–80 prosenttiyksikköä pienemmät. Päästövähennykselle annetut kriteerit riippuvat laitoksen toiminnan aloitusajankohdasta, osuuden kasvaessa mitä uudemmassa laitoksesta on kyse. Kasvihuonepäästöihin ei ole laskettu jätteistä ja tähteistä aiheutuneita päästöjä ennen niiden keräämistä. (Laki biopolttoaineista, bionesteistä ja biomassapolttoaineista 393/2013 § 6)

Momentit 7 §, 8 §, ja 9 § käsittelevät maataloudesta peräisin olevaa biomassaa. Momentin 7 § tavoitteena on ylläpitää biologista monimuotoisuutta rajoittamalla maatalousbiomassan käyttöä monimuotoisuuden kannalta merkittävilta alueilta. Momentissa 8 § rajoitetaan maatalousbiomassan käyttöä alueilta, joissa maankäyttömuoto on muuttunut pysyvästi vuoden 2008 tammikuun jälkeen ja momentin 9 § mukaan maatalousbiomassa ei saa olla peräisin aiemmin kuivattamattomalta

turvemaalta, jonka kuivatus on tapahtunut vuoden 2008 tammikuun jälkeen. (Laki biopolttoaineista, bionesteistä ja biomassapolttoaineista 393/2013 § 7, § 8, ja § 9)

Metsäbiomassasta tuotettujen biopolttoaineiden, bionesteiden ja biomassapolttoaineiden käyttöä säätelee momentti 10 §, jonka mukaan metsäbiomassa tulee olla valtiosta, joka lainsäädännöllään varmistaa vaadittavat kriteerit liittyen hakkuiden laillisuuteen, metsän uudistamiseen, luonnonsuojelualueiden suojeluun, maaperän laadun ja biologisen monimuotoisuuden ylläpitämiseen sekä metsän tuotantokapasiteetin ylläpitoon ja parantamiseen. (Laki biopolttoaineista, bionesteistä ja biomassapolttoaineista 393/2013 § 10)

Merkittävä tekijä biopohjaisten polttoaineiden saatavuuden ja käytön kannalta on jakeluelvoite. Sen tarkoituksena on edistää uusiutuvien polttoaineiden käyttöä moottoribensiiniin, dieselöljyn ja maakaasun korvaamiseksi liikenteessä. Jakeluelvoite on tarkemmin säädetty laissa uusiutuvien polttoaineiden käytön edistämisestä liikenteessä (446/2007).

Jakeluelvoitelaililla säädetään jakelijoiden velvollisuutta toimittaa kuluttajille uusiutuvia liikennepolttoaineita kulutukseen. Lain momentin 5 § mukaan vähintään miljoona litraa moottoribensiiniä, dieselöljyä, maakaasua, biopolttoaineita, biokaasua ja muuta kuin biologista alkuperää olevia uusiutuvia nestemäisiä ja kaasumaisia liikenteen polttoaineita toimittava jakelija on velvollinen toimittamaan uusiutuvia polttoaineita tietyn osuuden verran toimittamiensa polttoaineiden energiasisällöstä. (Energiavirasto, 2023) Uusiutuvien polttoaineiden vähimmäisosuudet kokonaisenergiasisällöstä on esitetty taulukossa 1.

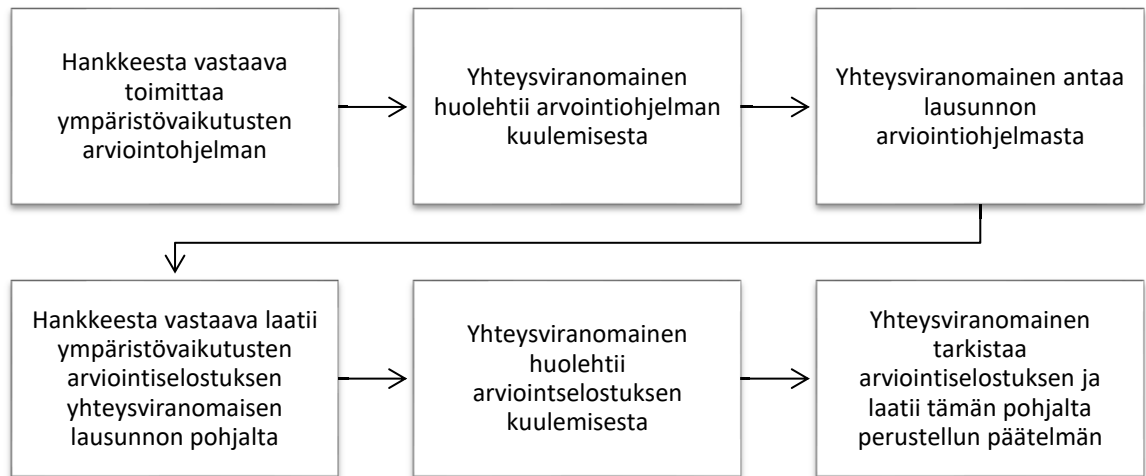
Taulukko 1. Jakeluelvoite (Energiavirasto, 2023).

Vuosi	Jakeluelvoite, %
2020	20.0
2021	18.0
2022	12.0
2023	13.5
2024	28.0
2025	29.0
2026	29.0
2027	30.0
2028	31.0
2029	32.0
2030 ja sen jälkeen	34.0

Jakeluelvoitteelle on asetettu myös lisävelvoite koskien tiettyjen uusiutuvien polttoaineiden käyttöä. Lisäksi jakeluelvollisten toimijan tulee täyttää tiettyjen uusiutuvien polttoaineiden vähimmäisvelvoite, johon lasketaan tietyistä raaka-aineista valmistetut biopolttoaineet ja biokaasu. (Energiavirasto, 2023)

### 3.2 Ympäristövaikutusten arviointimenettely

Lalla ympäristövaikutusten arviointimenettelystä (252/2017) pyritään edistämään ympäristövaikutusten arviointia ja sen yhtenäistä huomioonottamista suunnittelussa ja päätöksenteossa sekä edistää kaikkien tiedon saantia ja osallistumismahdollisuuksia. Lain luvussa 2 määritellyn ympäristövaikutusten arviointiprosessin eteneminen on esitelty vaiheittain kuvassa 3.



Kuva 3. Ympäristövaikutusten arviointimenettelyprosessin eteneminen

Ympäristövaikutusten arviointimenettelyn osapuolina toimivat hankkeesta vastaava taho, yhteysviranomainen eli elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus sekä hankkeen ulkopuoleiset kuulijat. Lakia sovelletaan biokaasulaitoksille, jotka ovat mitoitettu vähintään 35 000 tonnin vuotuiselle jätemäärälle.

### 3.3 Materiaalivirtojen käsittelyä ja tuotantoprosessia koskeva lainsäädäntö

Kiertotalouden edistämiseksi, jätteen määrän ja haitallisuuden vähentämiseksi sekä luonnonvarojen käytön kestävyuden parantamiseksi asetetun jätelain (646/2011) mukaan syntyvä jäte tulee ensisijaisesti valmistella uudelleenkäyttöä varten tai hyödyntää jäte muulla tapaa, esimerkiksi energiana. Luvun 2 momentissa 15 § on esitetty jätteiden erilliskeräysvelvollisuus eli jätteet, jotka ovat lajiltaan ja laadultaan erilaisia tulee kerätä toisistaan erillään, eikä niitä tule sekoittaa toisiin jätteisiin tai materiaaleihin. Lain mukaan erilliskerätty biojäte tulee toimittaa kunnan järjestämään jätehuoltoon. (Jätelaki 646/2011)

Eläimistä peräsin olevien sivutuotteiden käyttö omaa terveydellisiä vaaroja sekä ihmisten, että eläinten terveydelle. Näiden riskien hallitsemiseksi on annettu Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EY) N:o 1069/2009, muiden kuin ihmisravinnoksi tarkoitettujen eläimistä saatavien sivutuotteiden ja niistä johdettujen tuotteiden terveyssäännöistä sekä asetuksen (EY) N:o 1774/2002 kumoamisesta (sivutuoteasetus). Asetuksen 8–10 artikloissa sivutuotteet on jaettu kolmeen luokkaan niihin liittyvien riskien mukaan. (EY 1069/2009)

Luokalla 1 tarkoitetaan sivutuotteita, joissa on TSE-taudin riski, tuntematon riski tai ne sisältävät kiellettyjä aineita tai ympäristömyrkyjä. Tähän luokkaan kuuluu esimerkiksi EU:n ulkopuolelta peräisin oleva kansainvälisen liikenteen ruokajäte. Luokan 1 sivutuotteita ei saa käyttää biokaasulaitoksella, vaan ne tulee hävittää joko polttamalla tai hautaamalla. Luokkaan 2 kuuluvat sivutuotteet, joissa on muiden eläintautien kuin TSE-taudin riski tai eläinlääkejäämien riski. Näitä syötteitä ovat esimerkiksi lanta sekä teurastusjäte. Luokan 2 sivutuotteita voidaan käyttää biokaasuprosessissa, mutta ne tulee käsitellä painesteriloimalla 133°C:ssa 20 minuutin ajan. Sivutuotteet, jotka ovat peräisin ihmisravinnoksi hyväksytyistä eläimistä, kuten ruokajäte ja entiset elintarvikkeet, kuuluvat luokkaan 3. Näiden käyttö biokaasun tuotannossa vaatii hygienisoinnin 70°C:ssa yhden tunnin ajan. (Luste, Seppäläinen & Soininen, 2013, s. 30)

Biokaasuprosessin tuotteena syntyneen kaasuseoksen käsittelystä, varastoinnista ja säilytyksestä vastaavat laki vaarallisten kemikaalien ja räjähteiden käsittelyn turvallisuudesta (390/2005) sekä valtioneuvoston asetus vaarallisten kemikaalien käsittelyn ja varastoinnin valvonnasta (685/2015). Vaadittavat lupamenettelyt riippuvat siitä, onko kyseessä jalostettu biokaasu vai raakabiokaasu. Jalostetun biokaasun varastoinnille vaadittava lupamenettely on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Jalostetun biokaasun varastoinnin lupamenettely (Tukes, 2023b).

Jalostetun biokaasun varastoinnin lupamenettely	Puhdistettua biokaasua [tonnia]			
	0.2 t - alle 5 t	5 t - alle 50 t	50 t - alle 200 t	> 200 t
Ilmoitus Tukesille	x			
Lupa Tukesilta			x	

Toimintaperiaate- asiakirjalaitos (lupa Tukesilta)	x
Turvallisuus- selvityslaitos (lupa Tukesilta)	x

Jalostettuun biokaasuun, joka sisältää pääasiassa metaania (metaanipitoisuus >80 %) sovelletaan samaa lainsäädäntöä sekä vaatimuksia kuin maakaasuun. Biokaasua käsitellään maakaasusetuksen (1058/1993) mukaisesti, mikäli biokaasuputkisto laajenee biokaasulaitoksen ulkopuolelle, laitoksen yhteydessä on julkinen biokaasun tankkausasema, tai biokaasu talteen otetaan kaatopaikalta.

Puhdistamattoman biokaasun (metaanipitoisuus <80 %) valmistukseen, varastointiin ja välittömään käsittelyyn liittyvä lupa käsitellään valtioneuvoston asetuksen (685/2015) mukaisesti. Taulukossa 3 on esitetty raakabiokaasun valmistusta koskeva lupamenettely.

Taulukko 3. Biokaasun valmistuksen lupamenettely (Tukes, 2023b).

Biokaasun valmistuksen lupamenettely	Puhdistamattomaa biokaasua [tonnia]			
	1 t - alle 5 t	5 t - alle 10 t	10 t - alle 50 t	> 50 t
Ilmoitus pelastuslaitokselle	x			
Lupa Tukesilta		x		
Toimintaperiaate- asiakirjalaitos (lupa Tukesilta)			x	
Turvallisuus- selvityslaitos (lupa Tukesilta)				x

Lupa kattaa biokaasulaitoksen alueella olevan reaktorin, puhdistusyksikön, komprimointiyksikön, kattilalaitoksen kaasupolton sekä pullokonttien täyttämisen. Mukaan lasketaan biokaasun lisäksi myös kaikki muut laitoksen vaaralliset kemikaalit. (Tukes, 2023b)



## **4 BIOKAASUPROSESSI JA SEN MATERIAALIVIRRAT**

Tässä luvussa käsitellään tarkemmin biokaasuprosessien syötteitä, erilaisia tuotantoprosesseja sekä syntyviä tuotteita. Nämä tekijät ovat sidoksissa keskenään, sillä tuotantoprosessien valinta tehdään syötteiden ominaisuuksien pohjalta, ja puolestaan lopullisten tuotteiden koostumus on suoraan riippuvainen prosessiin syötettävien raaka-aineiden koostumuksesta.

### **4.1 Syötteen**

Biokaasu valmistetaan orgaanisesta jätteestä, eli käytännössä syötteenä kelpaa kaikki kasvi- ja eläinperäinen jäte, jossa piilevien ravintoaineiden on mahdollista hajota lopullisiksi tuotteiksi, eli metaaniksi ja hiilidioksidiksi. Ympäristöriskien ehkäisemiseksi tulee kiinnittää huomiota syötteiden koostumukseen sekä oikeanlaisiin esikäsitelymenetelmiin, sillä syötteissä olevat haitalliset aineet ovat läsnä myös lopullisissa tuotteissa. Tämän lisäksi syötteiden välillä on suuria eroja niissä piilevien energiapotentiaalien välillä, minkä vuoksi syötejakeita tulee tarkastella myös kokonaisprosessin kannattavuuden kannalta.

#### **4.1.1 Yhdyskuntien biojäte ja teollisuuden sivuvirrat**

Yhdyskuntien biojätteellä viitataan yleisesti kotitalouksien sekä palvelu- ja elinkeinotoiminnan tuottamaan biohajoavaan jätteeseen. Yleisesti ottaen biojäte päätyy biokaasulaitokselle syntypaikkalajittelun tai erilliskeräyksen kautta, mutta sitä voidaan myös laitoskäsitelyllä erottaa suoraan sekajätteestä. Yhdyskuntabiojäte koostuu pääosin keittiöbiojätteestä, paperista sekä puutarhajätteestä. Biojätteen kuiva-ainepitoisuuden on arvioitu olevan noin 20–35 %, orgaanisen osuuden ollessa välillä 70–90 % (Kymäläinen, 2015, s. 40).

Yhdyskuntabiojäte sisältää alkuperästä huolimatta miltei poikkeuksetta eläinperäistä materiaalia, jonka takia sen käsittelyssä tulee noudattaa eläinperäisiä sivutuotteita koskevaa asetusta 1069/2009, ja sen määräämää hygienisointikäsitelyä, tai vastaavaa hyväksyttyä käsittelyä. Biojättesyöte tulee tämän lisäksi myös esikäsitellä sen homogenisoimiseksi sekä epäpuhtauksien erottamiseksi (Kymäläinen, 2015, s. 41).

Syötteenä voivat toimia myös erinäiset teollisuuden jätteet, kuten elintarviketeollisuuden sekä metsäteollisuuden sivuvirrat. Elintarviketeollisuuden jätevirrat ovat pääosin peräisin teurastus- ja lihanjalostusaloilta, mylly- ja meijerituotteiden sekä alkoholi- ja virvoitusjuomien valmistuksesta (Tähti & Rintala, 2010). Yhdyskuntajätteen tapaan myös elintarviketeollisuuden sivuvirtoja käyttäessä tulee noudattaa asetusta EY 1069/2009, ja sen määäämiä hygienisointi- ja painesterilointimenettelyjä syöteaineen koostumuksesta riippuen.

Biokaasun tuotannossa käytettävät metsäteollisuuden jätevirrat ovat pitkälti peräisin sellu- ja paperiteollisuuden sivuvirroista, kuten pasta- ja siistauslietteestä. Kuitupitoiset lietteet eivät sovellu biokaasuntuotantoon niiden korkean ligniinipitoisuuden takia, sillä ligniini ei pysty hajoamaan hapettomissa olosuhteissa (Speight, 2019, s. 99).

#### **4.1.2 Maatalouden orgaaninen jäte**

Maataloudesta syntyy merkittäviä määriä orgaanista ainetta, jota voidaan hyödyntää biokaasun tuotannon raaka-aineena. Esimerkiksi kasvi- ja kotieläintuotannon sivutuotteet, kuten lanta, hävikkirehu sekä kasvijäte soveltuvat erinomaisesti biokaasuprosessin syötteenä, jonka lisäksi voidaan viljellä erikseen energiakasveja biokaasun tuotantoon (Luostarinen, 2015).

Ainemäärältään lanta on suurin maataloudesta peräisin olevista syötejakeista, mutta sen biokaasun tuotantopotentiaali on pienempi esimerkiksi hävikkirehuun verrattuna. Eläimet hyödyntävät rehun tehokkaasti, jolloin lantaan ei jää yhtä suurissa määrin helposti hajoavaa orgaanista ainetta. Lantaa voidaan hyödyntää maataloilla myös lannoitteena perinteistä lannankäsittelyketjua hyödyntäen, minkä myötä sen teoreettinen energiapotentiaali biokaasuprosessissa ei pääse toteutumaan täysin (Luostarinen et al., 2019). Lannan esikäsittelyssä tulee noudattaa Euroopan parlamentin ja neuvoston asettaman asetuksen 1069/2009 mukaista painesterilointiprosessia.

Syötteenä käytettävien energiakasvien hyödyllisyys vaihtelee tapauskohtaisesti, sillä joidenkin kasvien kohdalla kokonaisvaikutukset voivat olla jopa ympäristölle haitalliset niiden aiheuttaman maan käytön muutoksen takia. Erityisesti yksivuotiset kasvit, kuten maissi, omaavat huonon ympäristötaseen niiden jättäessä talveksi pellot paljaaksi ja

alttiiksi ravinnepäästöille. Energiakasveista parhaimman potentiaalin omaa nurmi, jota tuotetaan ennestään jo suurella mittakaavalla rehukäyttöön. (Kymäläinen, 2015, s. 33)

### **4.1.3 Puhdistamoliete**

Puhdistamolietteellä tarkoitetaan jätevedenpuhdistamolla muodostunutta jätevesilietettä. Suomessa puhdistamolietteet käsitellään yleensä jätevedenpuhdistamojen yhteydessä olevissa lietemädättämöissä, mutta lietteitä voidaan käsitellä myös muissa biokaasulaitoksissa, yleensä yhdessä yhdyskuntabiojätteen kanssa (Kymäläinen, s. 41).

Lietteet voidaan jaotella prosessivaiheen mukaan primääri- eli raaka-, sekundääri- ja tertiäärilietteisiiin. Biokaasuprosessissa syötteenä käytetään sekalietettä, joka koostuu prosessista poistetusta raaka- ja sekundäärilietteestä. Lietteelle ominaista on erittäin suuri vesipitoisuus (kuiva-ainepitoisuus noin 1 %), minkä vuoksi sitä tulee sakeuttaa tai tiivistää ennen syöttöä biokaasureaktoriin. Lisäksi liete tulee esikäsitellä hygienisoimalla bakteerien poistamiseksi. (Ruuhela, 2017)

## **4.2 Biokaasun tuotantoprosessit**

Biokaasureaktorit toimivat joko yksi- tai monivaiheisesti, eli mädätysprosessi voidaan suorittaa kokonaisuudessaan vain yhdessä reaktorissa, tai se voidaan jakaa useampaan reaktoriin eri hajoamisvaiheiden mukaan. Tällä hetkellä suurin osa biokaasuprosesseista toimii yksivaiheisesti. Tehokkuuden kannalta kaksivaiheisen prosessin käyttöönotto mahdollistaisi kuitenkin korkeamman biokaasun metaanipitoisuuden, sillä kaksivaiheisessa prosessissa hydrolyysi tapahtuu tehokkaammin yksivaiheiseen verrattuna, minkä myötä syntyviä rasvahappoja on enemmän saatavilla prosessin seuraavassa vaiheessa. (Baldi, Pecorini & Iannelli, 2019)

Luokittelu voi tapahtua myös märkä- ja kuivaprosesseiksi, mikä pohjautuu syötemateriaalien kuiva-ainepitoisuuteen, eli kuivan aineen osuuteen, joka jää jäljelle, kun aineesta on poistettu kosteus. Märkäprosesseissa kyseisen pitoisuuden tulee olla alle 10 %, kun taas kuivaprosesseissa reaktorit toimivat pitoisuuden ollessa yli 15 %. Märkäprosessissa kuiva-ainepitoisuuden pitämiseksi riittävän alhaisena voidaan materiaalivirtaa laimentaa hyödyntäen prosessista syntynyttä puhdistettua rejektivettä. (Speight, 2019, s. 70)

Tuotantoprosessit voivat toimia myös joko jatkuva- tai panostoimisesti. Jatkuvilla prosesseilla tarkoitetaan tasaista kaasuntuotantoa, jossa materiaalivirtaa syötetään ja poistetaan tasaisesti tietyin väliajoin. Panosprosessissa puolestaan reaktori täytetään syöteaineella, joka jätetään hajoamaan halutun ajan ennen tyhjennystä. Märkäprosessit toimivat poikkeuksetta jatkuvatoimisesti, kun taas kuivaprosesseissa voidaan hyödyntää molempia. Jatkuvatoimisessa reaktorissa uusi syötemateriaali pääsee sekoittumaan reaktorissa viipyneen materiaalin kanssa, joka tulee ottaa huomioon laitoksen mitoituksessa sekä viipymäajassa. Liian pieni reaktori ja lyhyt viipymäaika kasvattavat materiaalien sekoittumista, jonka seurauksena lopullisen mädätysjäännöksen metaanipitoisuus kasvaa. (Luostarinen, 2015, s. 84)

Meso- ja termofiilillä prosesseilla viitataan mädättämössä vallitseviin lämpötiloihin, joilla on suuri merkitys biokaasun tuotantonopeuteen ja saantiin. Yleisesti ottaen anaerobinen hajoaminen tapahtuu joko mesofiilissä (35°C) tai termofiilissä (55°C) lämpötiloissa. Mesofiilissä lämpötiloissa toimivia reaktoreja pidetään vakaampina ja ne sietävät paremmin erinäisiä häiriötekijöitä, kuten korkeita ammoniakkipitoisuuksia sekä lämpötilavaihteluja, joskin niiden mädätysnopeus on alhaisempi. Termofiilissä lämpötiloissa puolestaan mädätysnopeus on korkeampi, reaktioaika alhaisempi sekä patogeenien tuhoutuminen tehokkaampaa, mutta energiankulutus kasvaa huomattavasti. (Alrowais et al., 2023)

### **4.3 Tuotteet**

Biokaasuprosessissa syntyy kaksi päätuotetta, prosessin haluttu tuote eli pääosin metaanista ja hiilidioksidista koostuva kaasuseos sekä ylimääräiseksi jäänyt kiinteä biomassa eli mädätysjäännös. Sekä biokaasuseoksen, että myös mädätysjäännöksen koostumus ja ominaisuudet ovat suoraan riippuvaisia prosessissa syötteenä käytettyihin raaka-aineisiin.

#### **4.3.1 Biokaasuseos**

Biokaasuseos sisältää tyypillisesti suurimmaksi osaksi metaania ja hiilidioksidia, sekä pienissä määrin muita yhdisteitä, kuten typpeä, vetyä, vesihöyryä, VOC-yhdisteitä, ammoniakkia, siloksaaneja, rikkivetyä sekä muita rikkiyhdisteitä. Biokaasuseoksen koostumus vaihtelee kuitenkin hyvin paljon syöteaineesta riippuen. Esimerkiksi

puhdistamolietteitä käsittelevästä reaktorista peräisin oleva kaasuseos sisältää tyypillisesti vähemmän metaania verrattuna biojätettä käsittelevästä laitoksesta saatuun kaasuseokseen. Kaatopaikalla luontaisesti syntyvän biokaasun metaanipitoisuus puolestaan on kaikista pienin, typpipitoisuuden ollessa moninkertainen laitoksilta peräisin olevaan kaasuseokseen verrattuna. (Speight, 2019, s. 11)

Kaasuseoksessa oleva metaani ja vety ovat energiakaasuja, kun taas hiilidioksidi ja typpikaasu ovat inerttejä komponentteja, eli ne eivät sisällä energiaa, mutta eivät myöskään haittaa energiankäyttöä. Muut seoksen yhdisteet luokitellaan epäpuhtauksiksi ja vaikka ne sisältäisivät energiaa, halutaan ne poistaa laitteisto- ja päästöhaittojen ehkäisemiseksi. (Lampinen, 2015, s. 127)

Raaka biokaasu ei itsessään sovellu hyötykäyttöön, mutta sitä voidaan käyttää lämmityksessä ja sähköntuotannossa, mikäli se on puhdistettu käytettävän laitteiston vaatimusten mukaisesti. Puhdistus ei kohdistu inertteihin kaasuihin, vaan sen tarkoituksena on päästä eroon epäpuhtauksista, yleensä kohdistuen vesihöyryyn sekä rikkiyhdisteisiin. Liikennepolttoaineeksi tuotettaessa puolestaan kaasu tulee jalostaa vähentämällä inerttien kaasujen määrää ja näin ollen kasvattaen energiatihyettä. (Lampinen, 2015, s. 131, 134)

#### **4.3.2 Määtysjäännös**

Määtysjäännöksellä eli määtteellä tarkoitetaan biokaasuprosessista syntynyttä kiinteää, ravinnerikasta ainesta, jota voidaan hyödyntää lannoitteena sekä maanparannusaineena. Määtteen koostumus riippuu pitkälti käytetyistä raaka-aineista sekä määtysprosessista, josta riippuen jäännös voi olla joko lietemäistä (märkäprosessit) tai kuivalantamaista (kuivaprosessit). Jäännöksen neste- ja kuivajakeet voidaan separoida kuljettamisen ja käsiteltävyyden helpottamiseksi, jolloin kuivajae toimii lannoitteena ja nestejake voidaan hyödyntää puhdistuksen jälkeen tuotannossa prosessivetenä. (Horn et al., 2020)

Määtysjäännös sisältää merkittäviä määriä kasvun kannalta tärkeitä kivennäisaineita, kuten typpeä, fosforia sekä kaliumia, joiden määrä on pitkälti verrattavissa prosessin syöteaineissa olevien kivennäisaineiden konsentraatioon. Nämä kivennäisaineet ovat määtteessä helposti saatavilla kasveille, minkä vuoksi se vastaa ominaisuuksiltaan pitkälti mineraalilannoitteita. Näiden ominaisuuksien ansiosta sitä voidaan hyödyntää

korvaamaan mineraalipohjaisia lannoitteita. Mädätysjäännöstä voidaan myös tarvittaessa jatkojalostaa sen ravinteiden väkevöimiseksi sekä tilavuuden pienentämiseksi. (Koszela & Lorencowicz, 2015)

## 5 YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET JA NIIDEN HALLINTA

Biokaasualan ympäristövaikutuksia miettiessä tulee kiinnittää huomiota koko prosessin elinkaareen aina syötteiden esikäsittelystä lopullisten tuotteiden jatkokäsittelyyn ja hyödyntämiseen. Aiemmin esitelty lainsäädäntö toimii tärkeänä pohjana ympäristöhaittojen ehkäisyssä, mutta tässä kappaleessa paneudutaan tarkemmin yksittäisiin riskitekijöihin, niiden lähteisiin sekä mahdollisiin hallintamenetelmiin.

### 5.1 Mädätysjäännös

Ravinnerikkaiden ominaisuuksiensa ansiosta biokaasuntuotannon sivutuotteena syntyvä mädätysjäännös soveltuu hyvin lannoitekäyttöön mineraalilannoitteiden korvaajaksi. Mädätysjäännös voi kuitenkin pitää sisällään erinäisiä ympäristölle sekä ihmisten ja eläinten terveydelle haitallisia riskitekijöitä, kuten patogeenejä, mikrosaasteita sekä kaasupäästöjä. Toimivan ja ympäristöystävällisen lannoitekäytön toteuttamiseksi tulee noudattaa vaadittuja esikäsittely- ja varastointimenetelmiä sekä toteuttaa tarvittavat prosessiteknilliset ratkaisut.

#### 5.1.1 Patogeenit

Mädätysjäännös sisältää suurissa määrin erilaisia mikro-organismeja. Jäännöksen sisältämistä bakteereista suuri osa on vaarattomia, mutta osa bakteereista voivat olla patogeenisia ja näin ollen haitallisia maaperän laadulle, maaperässä kasvatetulle ruoalle sekä tätä kautta myös ihmisille ja eläimille (Nag et al., 2019).

Patogeeneilla tarkoitetaan biologisia tekijöitä; loisia, bakteereja ja viruksia, jotka voivat aiheuttaa tauteja sekä sairauksia ihmisissä, eläimissä ja kasveissa. Haitallisten patogeenien määrän ei tarvitse olla merkittävä aiheuttaakseen taudin puhkeamisen (Nag et al., 2019). Patogeenien haittoja voidaan hallita syötteiden oikeanlaisella esikäsittelyllä. Syöte tulee esikäsittää EU:n asetuksen (EY 1069/2009) mukaisesti joko painesteriloimalla tai hygienisoimalla riippuen syötejakeen alkuperästä. Esikäsittelyn lisäksi haitallisia patogeeneja voidaan eliminoida myös tuotanto-olosuhteilla. Korkeammassa lämpötilassa tapahtuva anaerobinen mätäneminen vaatii vähemmän aikaa

patogeenisten bakteerien inaktivoitumiselle, minkä vuoksi bakteerit kuolevat huomattavasti nopeammin termofiilissä olosuhteissa (Seruga et al., 2020).

### **5.1.2 Mikromuovit ja raskasmetallit**

Patogeenien lisäksi mädätysjäännös voi pitää sisällään myös erinäisiä mikrosaasteita, kuten mikromuoveja ja raskasmetalleja, joiden määrä mädätteessä on täysin riippuvainen siitä mitä syötteitä prosessissa käytetään. Mikromuovien pitoisuus on selkeästi suurin kotitalousjätteiden käsittelystä syntyneessä mädätteessä, sillä muovijätettä, kuten pakkausmateriaaleja, pääsee prosessiin erotusmenetelmistä huolimatta. Kotitalousjätteiden lisäksi myös jätevedenpuhdistamoilta peräisin oleva liete pitää sisällään merkittäviä määriä muovisaasteita, sillä suurin osa esimerkiksi tekstiilien sekä kosmetiikka- ja hygieniatuotteiden mikromuovikuiduista päätyy syötteenä käytettävään puhdistamolietteeseen. (Meixner, Kubiczek & Fritz, 2020)

Mikromuovien tavoin myös raskasmetallit voivat säilyä prosessissa aina mädätteeseen asti esikäsittelystä ja erottelumenetelmistä huolimatta. Erityisesti erilliskerätyn jätteen sisältämät epäpuhtaudet, kuten väärin lajitellut aterimet sekä metallipakkaukset saattavat aiheuttaa ongelmia lopullisessa mädätteessä. Mikäli mädätettä käytetään peltokäytössä, tulee sen täyttää tarvittavat vaatimukset metallipitoisuuksien osalta (Kymäläinen, 2015, s.43). Raskasmetalleja esiintyy ympäristössä luonnollisesti, mutta tietyt metallit, kuten nikkeli, kupari, lyijy sekä elohopea aiheuttavat vaaroja sekä ympäristölle että ihmisten terveydelle. Mädätteen lannoitekäytössä merkittävimpinä vaaroina ovat raskasmetallien huuhtoutuminen vesistöihin sekä haitallisten metallien siirtyminen lannoitteesta kasveihin ja tätä kautta eläimiin ja ihmisiin (Mitra et al., 2022).

### **5.1.3 Mädätysjäännöksen kaasupäästöt**

Biokaasuprosessin kokonaispäästöjen kannalta tulee huomioida mahdolliset päästöt mädätysjäännöksen varastoinnista ja käsittelystä. Hyvin toimivan biokaasuprosessin tavoitteena on muuttaa syöteaineissa olevat ravintoaineet biokaasuseokseksi menettämättä biokaasupotentiaalia. Huonosti suunnitellun prosessin seurauksena syöteaineiden biokaasupotentiaalia ei voida täysin hyödyntää, jolloin tuotetaan huonompilaatuista mädätysjäännöstä ja näin ollen jäännöksen käsittelyn sekä varastoinnin päästöriskit kasvavat (Luostarinen, 2015, s. 84).



Prosessin suunnittelussa tulee erityisesti kiinnittää huomiota laitoksen mitoitukseen sekä viipymäaikaan. Liian pienen reaktorin ja lyhyen viipymääjan seurauksena syöteaineet eivät kerkeä hajota riittävästi, jolloin hajonta tapahtuu luonnollisesti mädätysjäännöksen varastoinnin aikana (Luostarinen, 2015, s. 84). Käytännössä kuitenkin edes optimaalisesti suunnitellussa prosessissa täydellistä hajoamista ei pääse tapahtumaan, minkä takia vaaditaan käytännön toimenpiteitä myös varastoinnissa syntyviin kaasupäästöihin. Varastointitilojen lämpötilalla on tutkittu olevan vaikutusta metaanipäästöjen syntyyn päästöjen kasvaessa lämpötilan mukana, minkä vuoksi tulisi mädätysjäännöksen varastoinnin tapahtua 15°C:n alapuolella (Balde et al., 2016). Lisäksi mädätysjäännös tulisi varastoida kaasutiiviisti, jolla ehkäistään metaani- ja typpipäästöjen suora pääsy ilmaan (Paoliini et al., 2018).

## 5.2 Tuotantoprosessin kaasupäästöt ja laitosturvallisuus

Vaikka haitallisten yhdisteiden osuus kaasuseoksesta on pieni, voivat niiden ympäristövaikutukset olla merkittävät. Esimerkiksi lopullisessa kaasuseoksessa esiintyvien haihtuvien orgaanisten yhdisteiden on todettu aiheuttavan alailmakehän otsonin muodostumista ja yläilmakehän otsonin hajoamista. Suuri osa haihtuvista orgaanisista yhdisteistä (volatile organic compounds, VOC) on peräisin väärinlajitellusta kotitalousjätteestä (Speight, 2019, s. 12). VOC-yhdisteiden lisäksi ammoniakki sekä erityisesti rikkivety ja muut rikkipitoiset yhdisteet ovat merkittäviä sekä prosessille, että myös ympäristölle haitallisia yhdisteitä lopullisessa kaasuseoksessa. Ne aiheuttavat prosessissa korroosiota reagoidessaan veden kanssa, sekä ilmakehään vapauduttua rikkiyhdisteet voivat reagoida muodostaen ympäristölle haitallista rikkihappoa. Ammoniakki on rikkiyhdisteiden tapaan korroosiota aiheuttava yhdiste, ja ilmakehässä se hapettuu muodostaen typenoksideja, joita pidetään merkittävänä kasvihuonekaasuina. (Wesley et al., 2018)

Biokaasuseoksen riskitekijät jatkuvat myös tuotantoprosessin ulkopuolelle. Metaanin ollessa erittäin helposti syttyvä ja palava kaasu, tulee sen varastoinnissa ja käsittelyssä noudattaa erityistä varovallisuutta, jonka lisäksi riskien ehkäisemiseksi ja turvallisen toiminnan ylläpitämiseksi tulee olla tiedossa biokaasun syttymis- ja palamisominaisuudet. Näistä ominaisuuksista tärkeimmät ovat kaasulle ominaiset syttymisrajat. Syttymisrajat luokitellaan alempaan ja ylempään, ja ne perustuvat metaanin

ja hiilidioksidin suhteeseen. Alemmalla syttymisrajalla tarkoitetaan alhaisinta mahdollista metaanin konsentraatiota, jolla seoksen on mahdollista syttyä syttymislähteen läsnä ollessa. Ylempi syttymisraja tarkoittaa puolestaan korkeinta metaanin konsentraatiota, jolla seos voi syttyä. Ylä- ja alarajan välistä pitoisuusaluetta kutsutaan syttymisalueeksi. (Schroeder, Schlalau & Molnarne, 2014)

Räjähdyksvaarallisten tilojen ja niissä käytettävien laitteiden turvallisuuden ylläpitämiseksi on käytössä ATEX-direktiivit. Niiden tarkoituksena on suojella räjähdysvaarallisissa tiloissa työskenteleviä ihmisiä, sekä ylläpitää ja säätää tiloissa käytettävien laitteiden turvallisuusvaatimuksia (Tukes, 2017). ATEX-direktiivin mukaiset tilaluokitukset kaasu-ilma- sekä pöly-ilmaseokselle on esitetty alla taulukossa 4.

Taulukko 4. ATEX-tilaluokat (Tukes, 2017).

ATEX-tilaluokat		
Kaasu	Pöly	Esiintyvyys
0	20	Jatkuvasti, pitkäaikaisesti ja usein
1	21	Normaalitoiminnassa satunnaisesti
2	22	Normaalioloissa on epätodennäköistä ja se kestää vain lyhyen ajan

### 5.3 Hule- ja jätevedet

Hulevesillä tarkoitetaan pihoilta ja kaduilta poisjohdettua sade- ja kuivatusvettä. Hulevesien hallitsemiseksi pyritään ne ensisijaiseksi imeyttää maahan tai hyödyntämään syntypaikalla, ja tarvittaessa ohjaamaan hulevesiviemäriin (Vesi.fi, 2019).

Mikäli laitosalueen hulevedet johdetaan ympäristöön, tulee kiinnittää erityishuomiota siihen, että laitosalue pidetään puhtaana, etteivät sadevedet pääse huuhtelevaan orgaanista ainetta tai ravinteita vesistöihin (Paavola, 2015, s. 177). Rakennusten katoilta ja puhtailta piha-alueilta peräisin oleva vesi voidaan johtaa suoraan prosessiin

esikäsitteily- ja laimennusvedeksi. Mikäli hulevedet ovat peräisin piha-alueilta, jossa käsitellään tai varastoidaan jätteitä tai lannoitteita, tulee vedet johtaa biokaasuprosessin käsittelyyn, jonka jälkeen voidaan ne hyödyntää puhtaan veden tavoin esikäsitteily- ja laimennusvetenä. (Aluehallintovirasto, 2021)

## 5.4 Haju- ja melupäästöt

Biokaasulaitoksella syntyvät hajuhaitat ovat peräisin käsiteltävien raaka-aineiden vastaanotosta, tuotantoprosessissa massoista sekä lopputuotteista. Hajuhaittojen lähteitä on lukemattomia, joista usein häiritsevimpinä koetaan rikin yhdisteet sekä ammoniakki (Paavola, 2015, s. 173–174). Syötejakeista erityisesti teurasjäte sekä kananlanta muodostavat merkittävässä määrin hajukaasuja, kun taas yhdyskuntien biojäte sekä kasvipäriset materiaalit lukeutuvat vähemmän haiseviin syötteisiin (Pelkonen, 2013).

Raaka-aineiden vastaanottoon liittyvien hajuhaittojen pääsemistä ympäristöön voidaan ehkäistä sijoittamalla vastaanottojärjestelmät suljettaviin, alipaineistettuihin hallitiloihin, josta hajukaasut voidaan johtaa hajukaasujen käsittelyyn. Kaasun varastosäiliössä ja reaktorissa syntyvät hajukaasut voidaan myös johtaa hajukaasujen käsittelyyn tai tapauksesta riippuen suoraan biokaasun kanssa hyödynnettäväksi. Mädätteen varastoimisesta aiheutuvien hajuhaittojen ehkäisemiseksi voidaan varastosäiliöiden kaasutilat yhdistää hajukaasujen käsittelyjärjestelmään. Väkevien hajukaasujen kohdalla käytetään yleensä biologisia sekä kemiallisia pesureita. (Paavola, 2015, s. 174)

Biokaasulaitoksen meluhaitat ovat peräisin lähinnä jätteiden kuljetuksesta sekä tuotantolaitoksen laitteistosta, kuten murskaimesta, puhaltimista sekä pumpuista. Meluhaittojen ehkäisemiseksi voidaan vaikuttaa rakennusteknisillä toimenpiteillä, kuten laitteiden sijoittelulla. Keskeisintä kuitenkin meluhaittojen minimoimiseksi on laitoksen riittävä etäisyys muusta asutuksesta ja kiinteistöistä. (Pelkonen, 2013)

## 5.5 Ravinnesaasteet

Biokaasuprosessin mädätysjäännös on koostumukseltaan hyvin ravinnerikasta, minkä vuoksi se soveltuu hyvin lannoitekäyttöön. Sen sisältämät typpi ja fosfori edistävät viljelykasvien kasvua, mutta voivat olla liiallisissa määrin ympäristölle haitallista

kuormittaen vesistöjä ja aiheuttaen rehevöitymistä. Biokaasuprosessi muokkaa typen ja fosforin kemiallisia ominaisuuksia helpommin liukenevaan muotoon. Kasvit hyödyntävät paremmin helposti liukenevia ravinteita, mutta mikäli saatavilla olevien ravinteiden määrä on suurempi kuin mitä kasvit tarvitsevat, aiheutuu tästä ravinnevuotoja. Helposti liukenevat ravinteet ovat erityisen haitallisia vesistöille. (John Nurmisen Säätiö, 2021)

Tällä hetkellä maatalous kattaa yli puolet fosforin ja typen pistekuormituksesta ja noin kolme neljäsosaa hajakuormituksesta, joista merkittävä osa on peräisin lannoitteen käsittelystä (Vesi.fi, 2022). Lannoitekäytöstä aiheutuvia ravinnepäästöjä voidaan ehkäistä esimerkiksi suojavyöhykkeillä, kosteikoilla sekä pelloilla tehtävillä teknisillä ratkaisulla, kuten lannoitustasojen madaltamisella sekä syyskynnön korvaamisella kevennetyllä muokkauksikäytännöllä, talviaikaisella sängellä tai suorakylvöllä (Tattari et al., 2015). Myös mädätysjäännöksen varastointi sekä käsittely kasvattavat mahdollisten ravinnesaasteiden riskiä. Näiden riskien ehkäisemiseksi varastojen tulee olla vesitiiviitä ja kestäviä, nestemäiset ja nopeasti mätänevät syötejakeet tulee olla suljetuissa säiliöissä, sekä varastotiloissa tulee olla oikeinsuunnitellut viemäriverkostot, joilla nestemäiset jakeet voidaan tarvittaessa johtaa takaisin prosessiin (John Nurmisen Säätiö, 2021).

Ravinnesaasteet eivät rajoitu pelkästään mädätysjäännöksen käyttöön ja käsittelyyn, vaan riskit ovat läsnä myös itse tuotantoprosessissa. Jätevedenpuhdistamolle ohjatut biokaasuprosessin rejektivedet voivat aiheuttaa paikallisia ravinnepäästöjä pintavesiin, sillä sen typpipitoisuudet voivat olla liian suuria jätevedenpuhdistamon käsiteltäväksi, etenkin jos kyseessä on pienemmän mittakaavan puhdistamo. Tämän hallitsemiseksi tulee rejektivesien käsittelyverkostot suunnitella huolellisesti sekä mitoittaa jätevedenpuhdistamot siten, että ne pystyvät turvallisesti käsittelemään niihin johdettuja rejektivesiä. (Rolamo et al., 2018)

## 6 POHDINTA

Mikään energiantuotantomenetelmä ei ole täysin riskitöntä. Myös uusiutuvan energian tuotanto vaatii vastuullista suhtautumista sekä tarvittavaa riskienarviointia ympäristövaikutusten ehkäisemiseksi sekä kestävien energiajärjestelmien ylläpitämiseksi. Siitä huolimatta, että biokaasuntuotannossa esiintyy useita ympäristöön sekä ihmisten ja eläinten terveyteen vaikuttavia riskitekijöitä, on se kokonaisvaikutuksiltaan selkeästi fossiilisia vastineitaan ympäristöystävällisempi.

Biokaasualan liittyviä ympäristövaikutuksia tarkastellessa tulee tiedostaa, ettei valtaosa mahdollisista riskitekijöistä eivät ole ainutlaatuisia biokaasun tuotannolle, vaan ne ovat läsnä myös muissa energiantuotantomenetelmissä. Esimerkiksi melupäästöt sekä hulevesien hallinta ovat miltei poikkeuksetta ongelmia energialähteestä riippumatta sekä kaasupäästöt ja räjähdysherkkyys pätevät myös maakaasuun. Tämän lisäksi lannoitteena käytettävään mädätysjäännökseen liittyvät riskitekijät, kuten siinä esiintyvät mikromuovit, raskasmetallit sekä mahdolliset ympäristöä kuormittavat ravinnesaasteet, pätevät muillekin lannoitteille. Biokaasuntuotannon mahdollisuus estää metaanin hallitsematon pääsy ilmaan ja sen hyödyntäminen energiana on sen sijaan uniikki ominaisuus biokaasulle.

Biokaasun elinkaaren ympäristökuormitusta pohtiessa tulee myös ottaa huomioon biokaasun sekä mädätysjäännöksen logistiikkaan liittyvät kysymykset. Vaikka biokaasun positiiviset vaikutukset ovat jo hyvin tiedossa, tulee pohtia koko prosessin kannattavuutta, mikäli syötteitä tai lopullisia tuotteita joudutaan kuljettamaan merkittäviä matkoja. Tähän voidaan vaikuttaa biokaasulaitosten järkevällä sijoittamisella, ja tälläkin hetkellä esimerkiksi maatalouden biomassat hyödynnetään yleensä tilojen yhteydessä olevissa mädättämöissä sekä jätevedenpuhdistamojen lietteet käsitellään puhdistamojen yhteydessä.

Biokaasun sekä biopolttoaineiden positiivisten ympäristövaikutusten ollessa hyvin tiedossa, mikä estää niiden käyttöönoton laajemmalla mittakaavalla? Uusiutuvien polttoaineiden käyttöönoton suhteen elämme merkittävää käännekohtaa. Edelleenkin fossiilisten polttoaineiden helppo saatavuus ja edullisuus kuitenkin hidastavat biokaasun kaltaisten vaihtoehtojen yleistymistä. Tämän takia vaaditaan rakenteellisia muutoksia,

minkä suhteen onkin jo otettu edistysaskelia esimerkiksi biokaasun sisällyttämisellä jakeluvaihtoehtoon vuonna 2021. Jossakin määrin biokaasun käyttöä etenkin liikennepolttoaineena voidaan edistää tuomalla asiaa paremmin kuluttajien tietoisuuteen, kehittämällä ja laajentamalla voimassa olevaa jakeluverkostoa sekä tukemalla ja helpottamalla biokaasukäyttöisten ajoneuvojen saatavuutta. Uusien laitosten perustamista voidaan edistää keskittämällä laitoksiin liittyvät lupa- ja rahoitusasiat yhteen paikkaan, sen sijaan että ne hajautettaisiin useammalle viranomais taholle.

Biokaasuala kokonaisuudessaan omaa merkittävän potentiaalin fossiilisten polttoaineiden korvaajaksi. Biokaasun tuotantoon liittyvien negatiivisten ympäristövaikutusten ehkäisemiseksi tärkeintä on tarkastella vaikutuksia läpi elinkaaren ja pyrkiä ehkäisemään esiintyvät riskitekijät mahdollisimman aikaisessa vaiheessa kokonaisprosessia, jolloin ne eivät pääse hankaloittamaan lopullisten tuotteiden hyödyntämistä.

## LÄHDELUETTELO

Alrowais R., Said N., Al-Otaibi A., Hatata A., Essa M., Abdel daiem M. 2023. Comparing the effect of mesophilic and thermophilic anaerobic co-digestion for sustainable biogas production: An experimental and recurrent neural network model study. *Journal of Cleaner Production*, 392, 136248. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136248>. [viitattu 1.4.2023]

Aluehallintovirasto. 2021. Biokaasulaitoksen toiminnan olennainen muuttaminen, ammoniumveden jätteeksi luokittelun päättymisen ja toiminnanaloittamislupa, Kuopio. [asiakirja] Diaarinumero: ISAVI/9278/2019 [viitattu 22.5.2023]

Baldé H., VanderZaag A., Burt S., Wagner-Riddle C., Crolla A., Desjardins R., MacDonald D. Methane emissions from digestate at an agricultural biogas plant. *Bioresource Technology Volume 216, September 2016, Pages 914-922*. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.06.031> [viitattu 8.6.2023]

Baldi F., Pecorini I., Iannelli R. 2019. Comparison of single-stage and two-stage anaerobic co-digestion of food waste and activated sludge for hydrogen and methane production, *Renewable Energy*, 143, 1755–1765. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.122>. [viitattu 1.4.2023]

Biovoima. 2019a. Biokaasulaitos [verkkodokumentti] Saatavissa: <https://biovoima.com/ratkaisut/biokaasulaitos> [viitattu 25.3.2023]

Biovoima. 2019b. Biokaasu. [verkkodokumentti] Saatavissa: <https://biovoima.com/biokaasu> [viitattu 7.4.2023]

Energiavirasto. 2023. Jakeluvaihteohje [verkkodokumentti] Saatavissa: <https://energiavirasto.fi/jakeluvaihte> [viitattu 7.4.2023]

Euroopan parlamentti. 2018. Mikromuovit: lähteet, haitat ja EU:n ratkaisut [verkkodokumentti] Saatavissa: [https://www.europarl.europa.eu/news/fi/headlines/society/20181116STO19217/mikromuovit-lahteet-haitat-ja-eu-n-ratkaisut?at\\_campaign=20234-](https://www.europarl.europa.eu/news/fi/headlines/society/20181116STO19217/mikromuovit-lahteet-haitat-ja-eu-n-ratkaisut?at_campaign=20234-)

Economy&at\_medium=Google\_Ads&at\_platform=Search&at\_creation=DSA&at\_goal=TR\_G&at\_audience=&at\_topic=Plastic\_Waste&gclid=CjwKCAjwhJukBhBPEiwAniIcNeqRZDE6nwxaVyiKoGEvvXTvq1F2X4UYqC2iN0PIkluqSfXkr3vN4BoCLtYQAvD\_BwE [viitattu 13.6.2023]

Gasum. 2023. Renewable biogas for efficient emission cuts [verkkodokumentti] Saatavissa: <https://www.gasum.com/en/our-operations/biogas-production/biogas-emissions/> [viitattu 12.6.2023]

Horn S., Seppänen A., Winqvist E., Lehtoranta S., Luostarinen S. 2020. Biokaasulaitoksen mädätysjäännöksen hyödyntämismvaihtoehdot – vaihtoehtojen ilmastovaikutukset ja taloudellisuus. *Suomen ympäristökeskuksen raportteja 42 | 2020. Suomen ympäristökeskus, 44 s.* ISBN:978-952-11-5229-0 Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-11-5229-0> [viitattu 23.5.2023]

John Nurmisen Säätiö. 2021. Nutrient management at biogas plants in Finland [verkkodokumentti] Saatavissa: <https://sustainablebiogas.eu/materials/> [viitattu 5.6.2023]

Jätelaki (17.6.2011/646) [verkkodokumentti] Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2011/20110646> [viitattu 8.5.2023]

Koszela M., Lorencowicz E. 2015. Agricultural use of biogas digestate as a replacement fertilizers. *Agriculture and Agricultural Science Procedia 7 (2015) 119 – 124.* Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2015.12.004> [viitattu 26.5.2023]

Kymäläinen M., Teoksessa: Kymäläinen M., Pakarinen O. (toim.) 2015. Biokaasuteknologia – Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen. *HAMKin julkaisuja 36/2015. Hämeen ammattikorkeakoulu, s. 22-32, 39-44* ISBN:978-952-11-5229-0, 978-952-11-5229-0 Saatavissa: <https://urn.fi/URN:ISBN:978-951-784-771-1> [viitattu 26.3.2023]

Laki biopolttoaineista, bionesteistä ja biomassapolttoaineista. (7.6.2013/393) [verkkodokumentti] Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2013/20130393#P4> [viitattu 1.4.2023]



Laki uusiutuvien polttoaineiden käytön edistämisestä liikenteessä (13.4.2007/446)  
[verkkodokumentti] Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2007/20070446>  
[viitattu 1.4.2023]

Laki vaarallisten kemikaalien ja räjähteiden käsittelyn turvallisuudesta (3.6.2005/390)  
[verkkodokumentti] Saatavissa:  
<https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2005/20050390#L3P22> [viitattu 16.4.2023]

Lampinen A. Teoksessa: Kymäläinen M., Pakarinen O. (toim.) 2015. Biokaasuteknologia – Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen. *HAMKin julkaisuja 36/2015. Hämeen ammattikorkeakoulu, s. 124–171* ISBN:978–952-11-5229-0, 978-952-11-5229-0 Saatavissa: <https://urn.fi/URN:ISBN:978-951-784-771-1> [viitattu 23.5.2023]

Luostarinen S. Teoksessa: Kymäläinen M., Pakarinen O. (toim.) 2015. Biokaasuteknologia – Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen. *HAMKin julkaisuja 36/2015. Hämeen ammattikorkeakoulu, s. 32–39, 82–92* ISBN:978–952-11-5229-0, 978-952-11-5229-0 Saatavissa: <https://urn.fi/URN:ISBN:978-951-784-771-1> [viitattu 26.3.2023]

Luostarinen S., Tampio E., Niskanen O., Koikkalainen K., Kauppila J., Valve H., Salo T., Ylivainio K. 2019. Lantabiokaasutuen toteuttamisvaihtoehdot. *Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 40/2019. Luonnonvarakeskus, 75 s.* ISBN 978-952-326-777-0 Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-777-0> [viitattu 20.4.2023]

Luste S., Seppäläinen S., Soininen H. 2013. Teoksessa: Energiaomavarainen maatila. *Helsingin yliopisto Ruralia-instituutti julkaisuja 2, s. 27-40* ISBN 978-952-10-6531-6 Saatavissa: <http://hdl.handle.net/10138/228147> [viitattu 10.4.2023]

Maakaasusetus (1058/1993) [verkkodokumentti] Saatavissa:  
<https://finlex.fi/fi/laki/alkup/1993/19931058> [viitattu 19.6.2023]

Meixner K., Kubiczek M., Fritz I. 2020. Microplastic in soil–current status in Europe with special focus on method tests with Austrian samples. *AIMS Environmental Science, 7(2): 174–191*. Saatavissa: <https://doi.org/10.3934/environsci.2020011> [viitattu 9.6.2023]

Mitra S., Chakraborty A.J., Tareq A. M., Emran T. B., Nainu F., Khusro A., Idris A., Khandaker M., Osman H., Alhumaydhi F., Simal-Gandara J. 2022. Impact of heavy metals on the environment and human health: Novel therapeutic insights to counter the toxicity. *Journal of King Saud University - Science, Volume 34, Issue 3, 2022, 101865* Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.101865>. [viitattu 11.6.2023]

Motiva. 2013. Biokaasun tuotanto maatilalla [verkkodokumentti] Saatavissa: [https://www.motiva.fi/files/6958/Biokaasun\\_tuotanto\\_maatilalla.pdf](https://www.motiva.fi/files/6958/Biokaasun_tuotanto_maatilalla.pdf) [viitattu 26.3.2023]

Nag, R., Auer, A., Markey, B., Whyte, P., Nolan, S., O'Flaherty V., Russell L., Bolton D., Fenton O., Richards K., Cummins E. 2019. Anaerobic digestion of agricultural manure and biomass – Critical indicators of risk and knowledge gaps. *Science of the Total Environment* 690 (2019) 460–479. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.512> [viitattu 5.6.2023]

Paavola T., Teoksessa: Kymäläinen M., Pakarinen O. (toim.) 2015. Biokaasuteknologia – Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen. *HAMKin julkaisuja 36/2015. Hämeen ammattikorkeakoulu, s. 173-180* ISBN:978–952-11-5229-0, 978-952-11-5229-0 Saatavissa: <https://urn.fi/URN:ISBN:978-951-784-771-1> [viitattu 27.5.2023]

Paolini V., Petracchini F., Segreto M., Tomassetti L, Naja N., Cecinato A. 2018. Environmental impact of biogas: A short review of current knowledge. *Journal of Environmental Science and Health, Part A, 53:10, 899-906*. Saatavissa: <https://doi.org/10.1080/10934529.2018.1459076> [viitattu 8.6.2023]

Pasvikmonitoring. 2023. Raskasmetallit [verkkodokumentti] Saatavissa: <https://www.pasvikmonitoring.org/suomi/raskasmetallit.html> [viitattu 13.6.2023]

Pelkonen R. 2013. Maatalouden biokaasulaitoksen ympäristölupa. *Suomen ympäristökeskuksen raportteja 33 | 2013. Suomen ympäristökeskus, 67 s.* ISBN 978-952-11-4232-1 Saatavissa: <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/42289> [viitattu 31.5.2023]

Rolamo N., Järvinen M., Nissinen P., Sahlstedt K. 2018. Risk assessment of nutrient discharges from biogas production: Finland [verkkodokumentti] Saatavissa:

<https://johnnurmisen-saatio.fi/hankkeet/biokaasutuotannon-riskiselvitys/> [viitattu 5.6.2023]

Ruuhela S. 2017. Puhdistamolietteen käsittelyn hankinnan laatukriteerien kehittäminen. *Elinkeino- liikenne- ja ympäristökeskus raportteja 18/2017. Varsinais-Suomen elinkeino- , liikenne- ja ympäristökeskus / Ravinneneutraali kunta -hanke, 80 s.* ISBN 978-952-314-568-9 Saatavissa: <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-314-568-> [viitattu 20.4.2023]

Schroeder V., Schlalau B., Molnarne M. 2014. Explosion Protection in Biogas and Hybrid Power Plants. *Procedia Engineering Volume 84, 2014, Pages 259–272.* Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.433> [viitattu 30.5.2023]

Seruga P., Krzywonos M., Paluszak Z., Urbanowska A., Pawlak-Kruczek H., Niedźwiecki L., Pińkowska H. Pathogen Reduction Potential in Anaerobic Digestion of Organic Fraction of Municipal Solid Waste and Food Waste. *Molecules. 2020 Jan; 25(2): 275.* Saatavissa: doi: 10.3390/molecules25020275 [viitattu 5.6.2023]

Speight J. 2019. Biogas: Production and Properties [E-kirja] New York : Nova. 2019. ISBN: 9781536152784, 9781536152791. [viitattu 25.3.2023]

Suomen Biokierto ja Biokaasu ry. 2023a. Biokaasun käyttö [verkkodokumentti] Saatavissa: <https://biokierto.fi/biokaasu/kaytto/> [viitattu 13.6.2023]

Suomen Biokierto ja Biokaasu ry. 2023b. Kierrätyslannoitteet [verkkodokumentti] Saatavissa: <https://biokierto.fi/ravinteiden-kierratys/kierratyslannoitteet/> [viitattu 13.6.2023]

Suomen Biokierto ja Biokaasu ry. 2023c. Tilastot [verkkodokumentti] Saatavissa: <https://biokierto.fi/tilastot/> [viitattu 13.6.2023]

Tattari S., Puustinen M., Koskiahho J., Röman E., Riihimäki J. Vesistöjen ravinnekuormituksen lähteet ja vähentämismahdollisuudet. *Suomen ympäristökeskuksen raportteja 35 | 2015. Suomen ympäristökeskus, 73 s* ISBN 978-952-11-4534-6 Saatavissa: <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/159464> [viitattu 6.6.2023]

Tieteen termipankki. 2014. Mikrosaaste [verkkodokumentti] Saatavissa: <https://tieteentermipankki.fi/wiki/Nimitys:mikrosaaste> [viitattu 13.6.2023]

Tieteen termipankki. 2014. Raskasmetalli [verkkodokumentti] Saatavissa: <https://tieteentermipankki.fi/wiki/Mikrobiologia:raskasmetalli> [viitattu 13.6.2023]

Tukes. 2023a. Tuote-VOC: rakennus- ja korjausmaalit [verkkodokumentti] Saatavissa: <https://tukes.fi/kemikaalit/tuote-voc-rakennus-ja-korjausmaalit> [viitattu 13.6.2023]

Tukes. 2023b. Biokaasu [verkkodokumentti] Saatavissa: <https://tukes.fi/teollisuus/maakaasu-ja-biokaasu/biokaasu> [viitattu 10.4.2023]

Tukes. 2017. Atex – Starttipaketti [verkkodokumentti] Saatavissa: <https://tukes.fi/documents/5470659/8293726/ATEX-starttipaketti-2017.pdf/b440ed57-218e-4eda-a5b9-42df468e0b5f/ATEX-starttipaketti-2017.pdf> [viitattu 30.5.2023]

Työ- ja elinkeinoministeriö. 2022. Hiilineutraali Suomi 2035 – kansallinen ilmasto- ja energiastrategia. *Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja 2022:53. Työ- ja elinkeinoministeriö, 212 s.* ISBN 978-952-327-811-0 Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-327-811-0> [viitattu 12.6.2023]

Tähti H., Rintala J. 2010. Biometaanin ja -vedyn tuotantopotentiaali Suomessa. *Jyväskylän yliopiston bio- ja ympäristötieteiden laitoksen tiedonantoja 90.* ISBN 978-951-39-4043-0 Saatavissa: <https://jyx.jyu.fi/handle/123456789/37062> [viitattu 27.3.2023]

Valtioneuvoston asetus vaarallisten kemikaalien käsittelyn ja varastoinnin valvonnasta (685/2015) [verkkodokumentti] Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2015/20150685#Lidm45053758538400> [viitattu 16.4.2023]

Vesi.fi. 2019. Mitä on hulevesi? [verkkodokumentti] Saatavissa: <https://www.vesi.fi/vesitieto/mita-on-hulevesi/> [viitattu 27.5.2023]

Vesi.fi. 2022. Rehevöittävä kuormitus [verkkodokumentti] Saatavissa: <https://www.vesi.fi/vesitieto/rehevoittava-kuormitus/> [viitattu 5.6.2023]

Wesley O., Zhao Y., Nzihou A., Pham D., Lyczko N. 2018. A Review of Biogas Utilisation, Purification and Upgrading Technologies. *Waste and Biomass Valorization*, 2017, 8 (2), p.267–283. Saatavissa: <https://doi.org/10.1007/s12649-016-9826-4> [viitattu 22.5.2023]