

Biokaasulaitoksen prosessin hallinta

Case: Palopuron Biokaasu Oy

LAB-ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK), Energia- ja ympäristötekniikka, ympäristötekniikka

2021

Noora Laitala

Tiivistelmä

Tekijä(t) Laitala, Noora	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK Sivumäärä 51	Valmistumisaika 2021
Työn nimi Biokaasulaitoksen prosessin hallinta Case: Palopuron Biokaasu Oy		
Tutkinto Insinööri (AMK)		
Ohjaavan opettajan nimi, titteli ja organisaatio Jussi Kuusela, lehtori, Energia- ja ympäristötekniikka		
Toimeksiantajan nimi, titteli ja organisaatio Jarno Virtanen, toimitusjohtaja, Nivos Palvelut Oy		
Tiivistelmä <p>Opinnäytetyössä tutkittiin Hyvinkäällä toimivan Palopuron Biokaasu Oy:n panostoimisen kuivamädätykseen perustuvan biokaasulaitoksen prosessia. Lisäksi tutkittiin vesipesulla tapahtuvaa biokaasun jalostusta liikennepolttoaineeksi. Panostoiminen kuivamädätysprosessi on Suomessa vielä melko harvinainen, mutta tällä tavalla voidaan hyödyntää hitaasti hajoavia syötteitä, jotka eivät muuten soveltuisi biokaasun tuotantoon.</p> <p>Biokaasun tuotannon ja jalostamisen prosesseja selvitettiin paneutumalla olemassa olevaan teorian tietoon sekä laitoksen asiantuntijoita ja laitoksen toimittanutta, Metener Oy:n, pääsuunnittelijaa haastatteleamalla.</p> <p>Työssä on koottuna Palopuron biokaasulaitoksen prosessiin ohjauksen keskeiset parametrit. Lisäksi on käsitelty prosessin ohjaukseen, hajuhaittojen hallintaan sekä häiriötilanteisiin valmistautumiseen liittyviä tekijöitä.</p>		
Asiasanat Biokaasulaitos, biokaasun tuotanto, prosessinhallinta, biokaasun jalostus, panostoiminen kuivamädätys		

Abstract

Author(s) Laitala Noora	Type of Publication Thesis, UAS	Published 2021
	Number of Pages 51	
Title of Publication Process control of a biogas plant Case: Palopuron Biokaasu Oy		
Name of Degree Engineer (UAS)		
Name, title and organization of the supervising teacher Jussi Kuusela, Senior Lecturer, Energy and environmental engineering		
Name, title and organization of the client Jarno Virtanen, CEO, Nivos Palvelut Oy		
Abstract <p>Palopuron Biokaasu Oy is a biogas plant and upgrading unit with a filling station which processes were studied in this thesis. Biogas in this biogas plant is produced in a dry fermentation plant. Dry fermentation is still rarely used form of biogas production in Finland, but this way slowly degradable material, which could not be otherwise used in biogas production, can be utilised.</p> <p>The theory section examines biogas production and upgrading processes. The data was gathered partly from literature, partly by interviewing professionals working with the plant and interviewing the lead designer of the plant's designer and manufacturer Metener Ltd.</p> <p>This paper aims to explore the parameters that influence the biogas production and upgrading processes. In addition, this thesis deals with factors involving process management, odour nuisance and preparation to fault situations.</p>		
Keywords Biogas plant, biogas production, process control, biogas upgrading, dry fermentation		

Sisällys

1	Johdanto.....	1
2	Biokaasun tuotanto.....	3
2.1	Biokaasun hyödyntäminen ja ominaisuudet.....	3
2.2	Anaerobinen hajoaminen.....	3
2.3	Panostoiminen kuivamädätysprosessi.....	5
2.4	Biokaasun käsittely ja käyttötarkoitukset.....	6
2.4.1	Biokaasun tuotannossa huomioitava kaasun paine ja materiaalivalinnat	7
2.4.2	Rikkivety (H ₂ S).....	9
2.5	Mädätysjäännös	10
2.6	Prosessihallinta	11
3	Mädätysprosessin toimintaedellytykset.....	12
3.1	Prosessin hallintaan liittyviä tekijöitä	12
3.2	Lämpötila.....	12
3.3	pH.....	12
3.4	Haihtuvat rasvahapot ja alkaliteetti	13
3.5	Inhiboivat tekijät.....	13
4	Biokaasusta liikennepolttoainetta.....	15
4.1	Biokaasun jalostaminen.....	15
4.2	Vesipesu.....	16
4.3	Kaasun hajustaminen	19
5	Palopuron biokaasulaitos.....	20
5.1	Laitoksen kuvaus.....	20
5.2	Laitoksen toiminnan kuvaus.....	22
6	Mädätysprosessin hallinta Palopurolla.....	26
6.1	Panoksen vaihto	26
6.2	Perkolaationesteen kierto	26
6.3	Mädätysprosessin tilan seuranta.....	27
6.3.1	Seurattavat parametrit	27
6.3.2	Laboratorioanalyysit.....	29
6.4	Perkolaationesteen ja mädätteen sijoitus.....	30
7	Biokaasun hyödyntäminen Palopurolla	31
7.1	Biokaasun jalostaminen.....	31
7.2	Seurattavat parametrit	33
8	Hajuhaittojen hallinta ja häiriötilanteisiin varautuminen Palopurolla.....	36
8.1	Hajuhaittojen hallinta	36

8.2 Häiriötilanteisiin valmistautuminen	37
9 Johtopäätökset	40
10 Yhteenveto	41
Lähteet	42

Sanasto

Absorptio	Atomit, molekyylit tai atomit kiinnittyvät nesteeseen, kaasuun tai kiinteään aineeseen ilman kemiallista reaktiota
Adsorptio	Kaasumainen aine tai neste kiinnittyy kiinteään aineen pintaan
Ahjo	Nivoksella käytössä oleva kunnossapitojärjestelmä
Alkaliteetti	Veden puskurointikyky happoja vastaan
Anaerobinen	Hapeton
COD	Kemiallinen hapenkulutus
Desorptio	Atomien, molekyyliden tai ionien vapautuminen aineen pinnalle tai pintaan kiinnittyneiden molekyyliden irtoamisprosessi
LCFA	Long chain fatty acids, pitkäketjuiset rasvahapot
Perkolaationeste	Ravinnepitoista vettä, joka irtoaa panostoisessa kuivaprosessissa syötteestä. Voidaan kierrättää takaisin prosessiin.
TS	Total solids, kokonaiskiintoaine
Unitronics	Palopuron Biokaasu Oy: lla käytettävä automaatiojärjestelmä
VS	Volatile solids, orgaanisen aineen määrä
VFA	Volatile Fatty Acids, haihtuvat rasvahapot
Ympäri	Anaerobisen mädätysprosessin läpikäynyt mädäte, jota käytetään biokaasun tuotannon käynnistäjäa-ineena

1 Johdanto

Hyvinkäällä sijaitseva Palopuron Biokaasu Oy tuottaa biokaasua liikennekäyttöön läheiselle biokaasun tankkausasemalle. Palopuron biokaasua hyödyntää myös vieressä sijaitseva Knehtilän luomutila lämmitystarpeisiin. Opinnäytetyön tavoitteena oli tarkastella biokaasulaitoksen prosessia ja toimintaperiaatteita. Työssä on koottuna laitoksen ja jalostuksen toiminnan kannalta keskeiset parametrit. Tarkasteltavana ollut panostoiminen biokaasulaitos on ollut toiminnassa alkuvuodesta 2019.

Biokaasu on uusiutuva energianlähde ja sitä tuotetaan orgaanisen materian anaerobisen hajoamisen kautta. (Chen, Vinh-Thang, Ramirez, Rodrigue, & Kaliaguine 2015, 1.) Lähes mikä vain orgaaninen jäte soveltuu prosessin raaka-aineeksi ja on olemassa monia eri teknologioita biokaasun tuottamiseen anaerobisen prosessin kautta. Biokaasu luokitellaan uusiutuvaksi energiamuodoksi, ja tämän energiantuotannon muoto voidaan nähdä yhä kiinnostavampana ilmaston lämpenemisen sekä ympäristönsuojelun näkökohdista katsottuna. Anaerobinen hajoaminen mahdollistaa ympäristöpäästöjen vähentämisen samalla tuottaen biokaasua sekä orgaanisia lannoitteita. (Khalid, Arshad, Anjum, Mahmood & Dawson, 2011, 1738; Nasir, Ghazi, & Omar 2012, 321.) Jalostettua biokaasua voidaan hyödyntää liikennepolttoaineena, ja se on kemiallisesti lähes samanlaista kuin jalostettu maakaasu. Näitä molempia voidaan käyttää kaasuautoissa, ja niitä voidaan myös sekoittaa. (Suomen Biokierto ja Biokaasu ry.)

Työn alkuosiossa perehdytään ensin yleisellä tasolla biokaasun tuotantoon, sen hyödyntämismahdollisuuksiin sekä tuotannossa syntyvään mädätysjäännöksen käsittelyyn. Lisäksi työn alkupuolella käydään läpi mädätysprosessin hallintaan liittyviä osa-alueita. Työn toinen osio sisältää tarkempaa paneutumista Hyvinkäällä sijaitsevan Palopuron Biokaasu Oy:n biokaasulaitoksenprosessiin ja sen hallintakeinoihin. Opinnäytetyöstä rajattiin pois tankkausaseman prosessi, sillä tässä kohtaa kaivattiin nimenomaan biokaasulaitoksen sekä jalostuksen osalta prosessikuvausta.

Työn tilaajana toimii Nivos Palvelut Oy, joka kuuluu Nivos-konserniin ja vastaa Palopuron biokaasulaitoksen ja tankkausaseman käyttötoiminnasta. Palopuron biokaasulaitos tuottaa biokaasua jalostaen sitä liikennekäyttöön laitoksen lähellä sijaitsevalle Nivos Energia Oy:n omistamalle tankkausasemalle.

Laitoksen prosessinhallintakeinoihin kaivattiin lisää työkaluja. Tämä oli uusi prosessi yritykselle, sillä Nivos tarjoaa monipuolisia palveluita monella eri osa-alueella: kaukolämmön, kaasun, sähkön, netin ja veden parissa. Prosessin ohjaaminen tällaisella laitoksella on

monimutkainen kokonaisuus, ja laitoksen parissa työskentelee iso joukko eri asiantuntijoita, joilla kaikilla tulisi olla laitoksen toiminnasta ja sen prosessien ohjaamisesta selkeä kuva.

Prosessiin perehtyminen vaati monipuolista perehtymistä lähdekirjallisuuteen. Biokaasun tuotannosta sekä sen käyttötavoista löytyy sekä kansainvälisiä että kansallisia julkaisuja. Lähdekirjallisuuteen perehtymisen lisäksi olen saanut apua työhön Nivos Palvelut Oy:n asiantuntijoilta sekä laitostoimittaja, Metener Oy:n, pääsuunnittelija Juha Luostariselta.

2 Biokaasun tuotanto

2.1 Biokaasun hyödyntäminen ja ominaisuudet

Biokaasu on uusiutuva energiamuoto, jonka käyttömahdollisuudet ovat moninaiset. Biokaasua voidaan hyödyntää sähkön- ja lämmöntuotannossa tai sitä voidaan jalostaa biometaaniksi, jolloin se soveltuu liikennepolttoaineeksi. Biokaasuprosessissa syntyvä biokaasu sisältää noin 55–75 % metaania ja hiilidioksidia sekä pieniä määriä muita kaasuja (taulukko 1). Jalostusprosessissa kaasusta poistetaan hiilidioksidi sekä epäpuhtauksia, niin että metaanipitoisuus nousee noin 95–98 %:iin. Jalostettu biometaanikäy sellaisenaan kaasukäyttöisten ajoneuvojen polttoaineeksi. Hiukkaspäästöt ovat käytännössä olemattomat verrattuna perinteisiin polttoaineisiin. Fossiilisten polttoaineiden korvaaminen biokaasulla mahdollistaa huomattavasti pienemmät kasvihuonepäästöt. (Kinnunen & Rintala 2015, 17.)

Aine	%
Metaani, CH ₄	55-75
Hiilidioksidi, CO ₂	25-45
Hiilimonoksidi, CO	0-0,3
Typpi, N ₂	1-5
Vety, H ₂	0-3
Rikkivety, H ₂ S	0,1-0,5

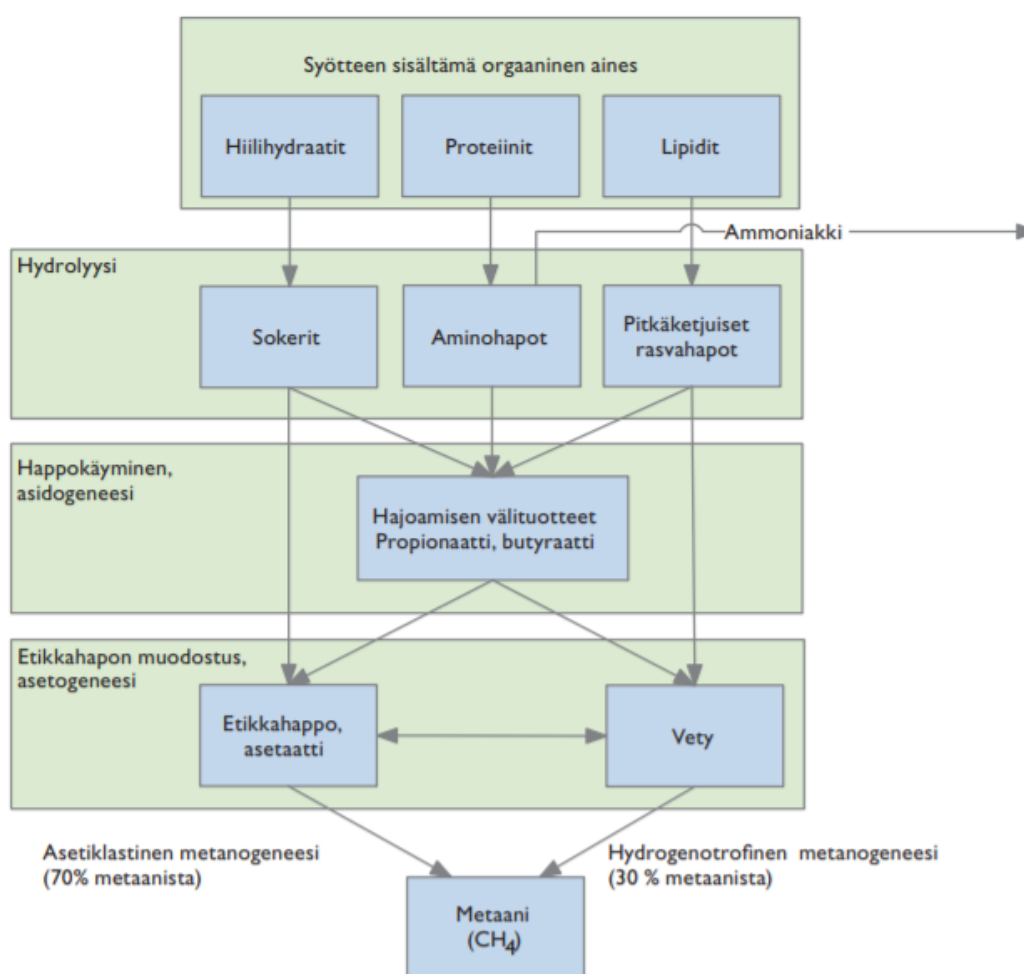
Taulukko 1. Biokaasun koostumus (Motiva 2013)

2.2 Anaerobinen hajoaminen

Biokaasun tuotanto perustuu anaerobiseen prosessiin, jossa pääraaka-aineena on orgaaninen aines. Hajoava bioaines tuottaa hapettomissa oloissa biokaasua. Raaka-aineena voidaan käyttää erilaisia biomassoja muun muassa maataloudesta ja yhdyskunnista syntyviä sivutuotteita ja jätteitä. Biokaasun tuottoon sekä kaasun metaanipitoisuuteen vaikuttavat raaka-aineen sisältämät yhdisteet. Raaka-aineen soveltuvuuteen vaikuttavat monet tekijät. Biokaasua voidaan tuottaa esimerkiksi kaatopaikoilta, jätevedenpuhdistamoilta tai maataloilta saatavasta biomassasta mädättämällä. Materiaalin ollessa erilaista riippuen fermentoitavan massan lähteestä vaihtelee myös saatavan biokaasun koostumus. (Kymäläinen &

Luostarinen 2015, 21–22; Bruijstens, Beuman, Molen, Rijke, Cloudt, Kadijk, Camp & Bleuanus 2008, 4.)

Biokaasu muodostuu neljässä vaiheessa, jotka ovat: hydrolyysi eli liukoistuminen, asidogeneesi eli happokäyminen, asetogeneesi eli etikkahappokäyminen sekä metanogeneesi eli metaanikäyminen (kuvio 1). Hajoamisprosessin vaiheet tapahtuvat samanaikaisesti. (Motiva 2013, 4.)



Kuvio 1. Syötteen anaerobinen hajoamisprosessi (Latvala 2009, 32)

Biokaasulaitoksen toiminta perustuu hapettomassa reaktorissa käsiteltävän aineen hajoamiseen, joko mesofiilisessä prosessissa (lämpötila noin 35–37° C) tai termofiilisessä

prosessissa (lämpötila 50–55 °C). Orgaanisen aineen hajoamisessa toimii eri vaiheissa olevat aktiiviset mikrobikannat, jotka käyttävät ravinnokseen orgaanista ainetta ja sen hajoamistuotteita. Biokaasulaitokselle syötettävä orgaaninen aines sisältää muun muassa hiilihydraatteja, proteiineja ja lipidejä, jotka hajoavat prosessissa ja pilkkoutuvat sokereiksi, aminohapoiksi ja pitkäketjuisiksi rasvahapoiksi (LCFA, long chain fatty acids). (Latvala 2009, 29.)

Happokäymisvaiheessa hajoamistuotteista muodostuu propionaattia ja butyraattia ja jotka hajoavat asetogeneesivaiheessa etikkahapoksi ja vedyksi. Metaania muodostuu, kun metaania tuottavat bakteerit muodostavat etikkahaposta ja vedystä metaania. Hydrolyysivaiheessa aminohapoista irtoava ammoniakki liukenee käsittelyjäännökseen. Hajoamisprosessin seurauksena syntyy biokaasua, joka sisältää pääosin metaania (CH₄) ja hiilidioksidia (CO₂). (Latvala 2009, 29). Jäljelle jäävää syötettä voidaan hyödyntää esimerkiksi kasvivillyssä. Syötejäännös sisältää kaikki pää- ja hivenravinteet, jotka syötteen raaka-aineiden mukana bioprosessiin on syötetty. Prosessin aikana tapahtuva typen mineralisaatio nostaa syötejäännöksen liukoisen typen määrää. Näin ollen biokaasuprosessissa jäljelle jäävä syötejäännös on kasvivillyssä arvokkaampaa kuin prosessiin alun perin syötetty materiaali. Biokaasuprosessin aikana tapahtuu myös hygienisointi, mikä tuhoaa taudinaiheuttajia ja rikkakasvien siemeniä. On kuitenkin huomattava, että typen mineralisaation määrä riippuu kuitenkin syötemateriaalista. Toinen huomattava hyöty, joka saadaan biokaasuprosessin kautta, on jäljelle jäävän syötejäännöksen hajua aiheuttavien yhdisteiden väheneminen jopa 90 %:lla. (Paavola 2015, 95.)

2.3 Panostoiminen kuivamädätysprosessi

Kuivaprosessissa syöteseos on märkäprosessia kuiva-ainepitoisuudeltaan korkeampaa. Syöteseos on kuiva-ainepitoisuudeltaan kuivaprosessissa 15–60 %. Kuivaprosessit ovat joko jatkuvatoimisia tai panostoimisia. Panostoiminen kuivaprosessi koostuu yleensä reaktoreista, perkolaationesteen kierrätysjärjestelmästä, kaasun talteenotto- ja puhdistusjärjestelmästä, CHP-voimalasta sekä jätteiden sekoitus- ja varastointikentästä. Prosessi voi olla mesofiilinen tai termofiilinen. Kuivaprosessissa kaasuntuotanto on tarvittavaan reaktoritilavuuteen ja rejektin (prosessissa syntyvä hyödyntämätön sivuvirta) määrään nähden suu-rempi kuin märkäprosessissa. (Latvala 2009, 32–33.)

Panostoiminen reaktori täytetään syötemateriaalilla ja jätetään reaktoriin hajoamaan biokaasun muodostumisprosessin ajaksi. Syötemateriaalin käsittely tapahtuu hydraulisesti, ruuveilla tai kuormaajalla pumppujen sijasta. Kaasuntuotannon tasaamiseksi voidaan käyttää useita panosreaktoreita, jolloin osa reaktoreista voi olla täytettävänä tai kaasun tuotannon alkuvaiheessa ja osa voi olla kaasuntuotannon aktiivisemmassa vaiheessa.

Viipymääjat ovat märkäprosessia käyttäviä laitoksia pidemmät, viipymäaika valitaan syötötmateriaalin mukaan. Syöttemateriaan voidaan sekoittaa joko prosessissa aiemmin ollutta mädätysjäännöstä ympiksi tai voidaan kierrättää käsiteltävän massan läpi suodattuvaa perkolaationestettä ja suihkuttaa sitä panosmassan päälle, näitä kutsutaan suotopetireaktoreiksi. Neste suodattuu suihkuttamisen jälkeen taas reaktorin pohjalle, josta se kerätään taas suihkutettavaksi. Tällä perkolaationesteen syötöllä kierrätetään mikrobistoa sekä säädelään syöttemassan kosteustasapainoa, lisäksi tämä säätelee hajoamisprosessia sekä kaasuntuottoa. Osa kuivaprosessista tuotetusta energiasta kuluu prosessin lämmitykseen. (Latvala 2009, 32–33; Luostarinen 2015, 87.)

Useimmiten maatilojen yhteydessä toimivat biokaasulaitokset ovat panostoimisia johtuen peltobiomassojen käytöstä syöttemateriaalina. Kuivaprosesseissa hyödynnetään syötteenä vain korkean kokonaiskiintoaineen sisältävää materiaa, kuten siipikarjan ja hevosen lantaa sekä peltobiomassaa. Tavallisin panostoiminen reaktori on niin sanottu autotallimalli, jossa reaktori täytetään kauhakuormaajalla ja suljetaan biokaasun tuotantoprosessin ajaksi. Kuivaprosessi voi olla myös jatkuvatoiminen, ja yksi tällainen malli on tulppavirtausreaktori. Keski-Euroopassa kuivaprosessia hyödyntäviä laitoksia on jonkin verran, mutta Suomessa nämä eivät ole vielä yleistyneet. (Marttinen ym. 2015, 16; Luostarinen 2009, 32.)

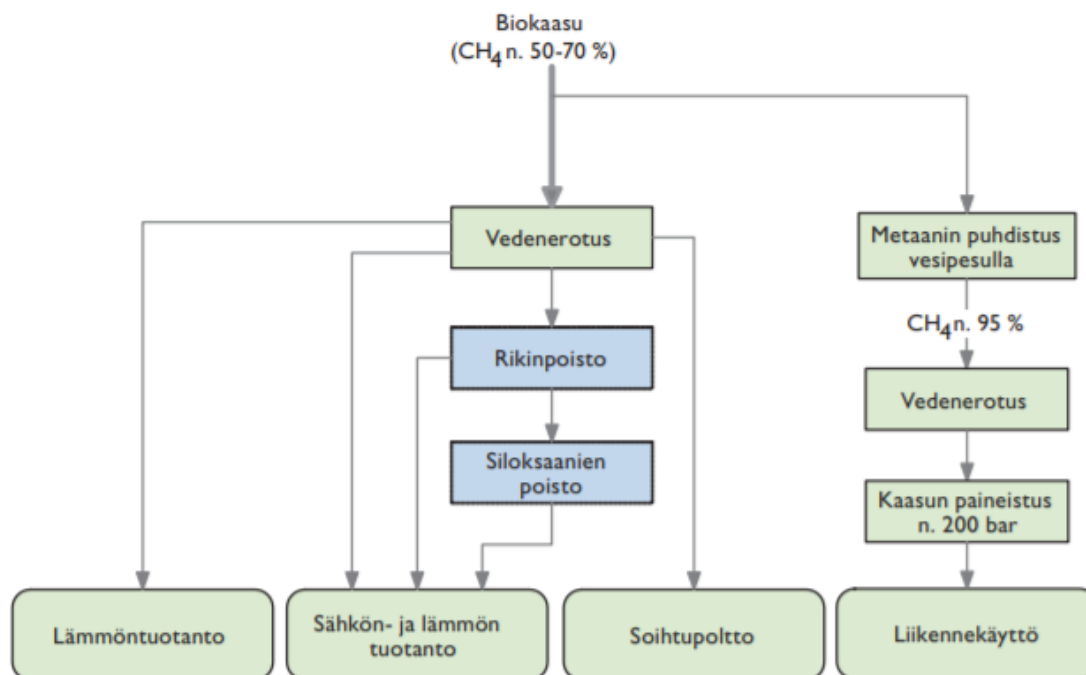
2.4 Biokaasun käsittely ja käyttötarkoitukset

Latvalan (2009, 44–46) mukaan biokaasulaitosta suunniteltaessa on mietittävä tuotettavan biokaasun käyttötarkoitusta. Erilaisia hyödyntämisvaihtoehtoja ovat: lämmöntuotanto, yhdistetty lämmön ja sähkön tuotanto (CHP), mekaaninen energia sekä liikennekäyttö. Biokaasulla tuotettua lämpöä hyödynnetään lähes jokaisella laitoksella lähinnä reaktorin lämmittämiseen. Lämmön ja sähkön yhteistuotanto on yleistynyt, sillä laitoksilla on sähköä ja lämpöä tarvitsevia toimintoja. Jätevedenpuhdistamoiden yhteydessä toimivilla biokaasulaitoksilla voidaan tuottaa mekaanista energiaa esimerkiksi ilmastukseen.

Lämpöä saadaan ohjaamalla biokaasu vedenerotuksen kautta kaasupolttimelle. Poltin lämmittää vettä laitoksen kiertovesijärjestelmään. Palamisreaktio biokaasulla on lähes vastaava kuin maakaasulla, biokaasulla on tosin korkeampi hiilidioksidipitoisuus ja alhaisempi energiasisältö. Mikäli biokaasu sisältää rikkivetyä, muodostuu palaessa myös rikkidioksidia. (Latvala 2009, 45.)

Mikäli biokaasua syntyy yli laitteiston hyödyntämiskapasiteetin, eikä varastointitila riitä biokaasun säilömiseksi, on yhtenä vaihtoehtona soihtupoltto. Soihtu on käytössä lähes jokaisella suomalaisella biokaasulaitoksella vararatkaisuna. Soihtupoltolla voidaan vähentää metaanin kasvihuonekaasuvaikutusta. (Latvala 2009, 48.)

Biokaasu on jalostettava esimerkiksi vesipesulla, ja siitä on poistettava sen sisältämä kosteus, ennen kuin sitä voidaan hyödyntää liikennekäytössä. Jalostuksessa suurin osa hiilidioksidista ja muista kaasuista on saatava erotettua biokaasusta, jotta sitä voidaan hyödyntää liikennekäytössä. Kuviossa 2 on kuvattu yleisimmät käsittelytavat ja käyttötarkoitukset biokaasun tuotannossa.



Kuvio 2. Biokaasun yleisimmät käsittelytavat ja käyttötarkoitukset (Latvala 2009, 42)

2.4.1 Biokaasun tuotannossa huomioitava kaasun paine ja materiaalivalinnat

Biokaasun tuotannossa ja käsittelyssä on monia huomioitavia seikkoja, jotka vaikuttavat merkittävästi prosessin turvalliseen toimintaan. Kaasun paineen vaihtelut voivat olla huomattava rasitustekijä laitteistoille, joten materiaalit on valittava tarkoin prosessiin sopiviksi. Rikkivety on kaasu, jota syntyy biokaasun syntyprosessissa, ja se voi tuottaa merkittäviä haittoja laitteistoille, henkilöstön terveydelle sekä hajuhaittoja laitoksen ympäristössä.

Kaasujärjestelmät perustuvat paineen käyttöön. Suunnittelussa ja materiaalien valinnoissa tulee huomioida laitoskohtaiset painetasot. Tuotanto, varastointi, siirto, jakelu ja käyttö vaativat eri painetasoja (kuva 1). Erityisesti täytyy kiinnittää huomiota toistuviin paineen

vaihteluihin, sillä tämä voi aiheuttaa ongelmia huokoisissa materiaaleissa, kuten tiivisteissä. (Kaasuyhdistys, 14–15.)

Tyypillisiä painetasoja (ylipaine) järjestelmän/ prosessin eri vaiheissa sekä käyttökohteissa:
• mädätysreaktori 0 - 25 mbarg
• kaatopaikkalaitoksen imuputkisto 0 - 100 mbarg (alipaine)
• kaasuvälikamero 2 - 25 mbarg
• kaasusoihtu 50 mbarg
• kaasupolttimet 20 - 250 mbarg
• kaasumoottori 150 mbarg
• kaasumikroturbiini 6 barg
• paikalliset biokaasuputkistot 100 mbarg - 4 barg
• verkkoon syöttö jakeluputkistoon 4 - 8 barg
• verkkoon syöttö siirtoputkistoon 30 - 54 barg
• nesteytetyn kaasun (LBG, LNG) höyrystymispaine 4 - 10 barg
• kaasukontit (CBG, CNG) < 300 barg
• tankkausasemat (CBG, CNG) 250 - 300 barg

Kuva 1. Tyypillisiä painetasoja biokaasuprosessissa (Kaasuyhdistys, 15)

Kemikaali- ja maakaasulainsäädännössä säädetään biokaasujärjestelmissä käytettävistä materiaaleista. Kaikkien biokaasuun kosketuksissa olevien materiaalien ja laitteistojen tulee soveltua biokaasulle. Materiaalivalinnoissa on huomioitava esimerkiksi raakabiokaasun kosteus, kondenssiveden kertyminen ja tyhjennys, happi sekä rikkivety ja muut epäpuhtaudet. PE-muovista valmistetut putket ovat yleisimmin käytetty ja käyttöön soveltuvin materiaali maanalaiselle biokaasuputkistolle laitokselta käyttökohteeseen. Maanpäälliset ja laitoksen sisällä olevat putket on pääosin tehty haponkestävästä teräksestä. Kemiallinen ja mekaaninen rasitus ovat lämpötilan lisäksi huomioitavia asioita biokaasureaktorin materiaalin valinnassa. Reaktorissa käytettäviä materiaaleja ovat muun muassa teräs, betoni ja muovi. Kaasuvälikameron rakennusmateriaalina kemiallisesti kestävä muovi ja kudosvahvistettu PVC-kangas on yleisimmin käytetty vaihtoehto. (Kaasuyhdistys 15–16.)

2.4.2 Rikkivety (H_2S)

Rikkivedyllä on hyvin epämiellyttävä haju, joka muistuttaa mätää kananmunaa, mutta hajuaisti lamaantuu jo rikkivedyn 100–150 ppm pitoisuudessa. Jo pienet pitoisuudet ärsyttävät limakalvoja ja hengitysteitä. Pitoisuuksien noustessa oireina voivat olla silmän polttava kipu, näön sumeneminen, hengenahdistus, huimaus, pahoinvointi ja sekavuus. Yli 500 ppm:n altistuminen johtaa jo viidessä minuutissa vakaviin hermostollisiin oireisiin ja tajuttomuuteen sekä kuolemaan jopa puolessa tunnissa. Rikkivety on vain hieman ilmaa raskaampaa, joten se ei kerrostu tai tuuletu itsestään. (Kaasuyhdistys, 17.)

Rikkivetyä syntyy sulfaatteja sisältävien proteiinien hajotessa tai bakteerien redusoidessa syötteen sulfaattia rikkivedyksi. Eli mitä enemmän syöte sisältää proteiineja, sitä enemmän syntyy anaerobisissa olosuhteissa rikkivetyä. Nämä bakteerit kilpailevat samasta kasvu- alustasta metaania muodostavien bakteerien kanssa, mutta biokaasun sijaan syntyy rikkivetyä. Biokaasun sisältämä rikkivety (H_2S) on saatava poistettua, sillä suurina määrinä se aiheuttaa ongelmia esimerkiksi lämmöntuotannossa ja rikkivety aiheuttaa korroosio-ongelmia laitteistossa, sillä rikkivety muodostaa veden kanssa rikkihappoa (H_2SO_4). Rikkivetyä sisältävän biokaasun poltto johtaa rikkihapon syntymiseen palamisreaktion tuotteena. Lisäksi rikkivety on myrkyllinen kaasu, joka voi suurina määrinä olla hengenvaarallinen. Rikkivety aiheuttaa myös hajuhaittoja. Rikkivety on helposti veteen liukeneva kaasu, ja se vapautuu ilmaan sitä helpommin mitä korkeampi veden lämpötila on. (Petersson 2013, 331–332; Latvala 2009,41; OVA-ohje: Rikkivety; Oram.)

Petersson (2013) käy läpi artikkelissaan rikkivedyn poistamisen keinoja biokaasuprosessissa. Rikkivetyä voidaan poistaa joko mädätysprosessin aikana tai sen jälkeen. Vesipesu on tehokas keino poistaa rikkivetyä, sillä se liukenee veteen jopa paremmin kuin hiilidioksidi. Rikkivedyn poistamiseen käytetyt menetelmät voidaan jakaa biologisiin, fysikaalisiin ja kemiallisiin menetelmiin.

Biologinen poisto

Ilman/hapen syöttäminen syötteeseen johtaa rikkivedyn reagoimiseen hapen kanssa muodostaen alkuainerikkiä, samalla saattaa syntyä myös rikkidioksidia. Liian hapen lisääminen inhiboi mädätysprosessia. Tärkeää on huomioida myös, ettei synny räjähdysvaarallista yhdistelmää metaaniin ja hapen kanssa. Samaa menetelmää, missä hyödynnetään happea rikkivedyn poistoon, voidaan käyttää myös mädätysreaktorin jälkeen biologisen suodattimen avulla. Suodattimessa on bakteereja, jotka voivat hapettaa rikkivedyn. Tällöin kolonni täytetään ison pinta-alan kantoaineilla, johon bakteerit voivat kasvaa. Biokaasu puhdistuu

kulkemalla kolonnin läpi. Syntyvä rikki jää nestemäiseen faasiin suodattimeen. (Petersson 2013, 337.)

Fysikaalinen poisto

Rikkivety voidaan poistaa raakabiokaasusta vettä hyödyntävillä absorptiomenetelmillä tai orgaanisilla liuottimilla. Yksi vanhimmista menetelmistä on natriumhydroksidipesu. Biokaasu voidaan myös jäähdyttää niin, että nestemäistä hiilidioksidia muodostuu, johon rikkivety sekä muita epäpuhtauksia liukenee. Rikkivedyn poistoon voidaan hyödyntää myös aktiivihiliä. Jos biokaasu jalostetaan, saadaan rikkivety poistettua prosessissa hiilidioksidin kanssa. Poiston teho riippuu kuitenkin jalostusprosessissa käytetystä tekniikasta. Usein on kuitenkin parasta saada rikkivety poistettua ennen jalostusprosessia. (Petersson 2013, 336–337.)

Kemiallinen poisto

Rikkivedyn päätymistä tuotettuun biokaasuun voidaan ehkäistä lisäämällä mädättämöön rautaioneita (Fe^{2+} tai Fe^{3+}). Rautaionit lisätään muodossa FeCl_2 , FeCl_3 tai FeSO_4 . Tätä menetelmää käytetään myös jätevesienpuhdistuslaitoksilla fosfaatin poistamiseksi. Rikkivety voidaan poistaa myös mädättämöreaktorin jälkeen. Päälystämällä materiaalia rautaoksidilla, kuten esimerkiksi puuhaketta, muodostuu rautasulfidia. Prosessi toimii kahdella kolumnilla. Rautaoksidi elvytetään lämmittämällä tai altistamalla se hapelle. Materiaali kyllästyy lopulta rikillä eikä sitä voida enää elvyttää. (Petersson 2013, 338.)

2.5 Mädätysjäännös

Biokaasun tuotannossa mädätyksen jälkeen mädätysjäännös voidaan hyödyntää viljelymaan lannoitteena. Mädätysjäännös on ravinnerikasta lannoitetta, sillä se sisältää syötteen sisältämiä ravinteita, kuten typpeä ja fosforia. Prosessissa olevaa perkolaationestettä voidaan myös hyödyntää maatalouden lannoitteena. Mädätysjäännöksen hyödyntäminen edistää ravinteiden kiertoa, ja sillä pystytään korvaamaan epäorgaanisia lannoitteita (Kinnula & Rintala 2015, 18.)

Kasvit tarvitsevat typpeä kasvaakseen, ja typen puute on viljelyssä ja sadontuotannossa rajoittava tekijä. Kasvit voivat hyödyntää typen maasta ammoniummuodossa NH_4^+ sekä nitraattimuodossa NO_3^- . (Ravinnerinki.)

Mädäte on parempaa lannoitetta kuin mädättämätön lanta, sillä ammoniumtypen määrä lisääntyy mädätysprosessin aikana. Lisäksi mädätteen haju on miedompaa kuin raakalannan, myös sen hygieeninen laatu paranee mätänemisprosessin aikana. (Kinnunen & Rintala 2015, 18.)

Lannoitteiden levityksestä pelloille on säädetty valtioneuvoston asetuksessa 931/2000. Asetuksessa todetaan, että typpilannoitteita ei saa levittää 15.10.–15.4. välisenä aikana. Mikäli maa on sulaa ja kuiva, voidaan levitystä jatkaa 15.11. asti, ja keväällä se voidaan aloittaa aikaisintaan 1.4. Tällöin on siis huomioitava, ettei ole varaa lannoitteiden valumisesta vesistöön ja ettei pohjamaan tiivistymisvaaraa ole.

2.6 Prosessihallinta

Kymäläisen (2015, 71) mukaan prosessihallinta on keskeisessä roolissa biokaasun tuotannon sekä sen jatkokäsittelyn kannalta. On tärkeää taata tasainen tuotanto, josta syntyy korkealaatuinen lopputuote. Syöteseoksen valinta ja sen ominaisuuksien tunteminen on prosessihallinnan lähtökohta. Syöteanalyysitietoja tarvitaan, mikäli syöteseoksessa tapahtuu muutoksia tai mikäli tapahtuu olosuhdemuutoksia.

Käytännössä biokaasuprosessin hallitsemiseksi on tunnettava anaerobinen hajoamisprosessi ja erityisesti prosessin mikrobiologia ja toimintaolosuhdevaatimukset. Prosessimitaukset ja analyysit auttavat prosessin tilan seuraamisessa ja optimoimisessa. Prosessin optimoinnilla saavutetaan hajoamisprosessin paras mahdollinen vakaus sekä kaasuntuotto. (Kymäläinen 2015, 59.)

Prosessia seurataan on-line-mittauksin, jotka riippuvat prosessityypistä ja hallintatavasta. Seurattavia mittauksia ovat muun muassa biokaasutuottomäärä, metaanipitoisuus, prosessilämpötila, pH sekä pinnankorkeus. Prosessin tilaa seurataan myös näytteenotoin sekä laboratorioanalyysien avulla. Automaatiojärjestelmät ovat yleistyneet biokaasulaitoksilla, ja näin ollen prosessihallinta on helpottunut sekä mahdollisiin prosessihäiriöihin voidaan reagoida nopeammin. Automaatiojärjestelmä tuo myös turvallisuutta laitoksen toimintaa ajatellen. Hyvällä prosessihallinnalla taataan turvallinen biokaasun tuotanto. (Kymäläinen 2015, 75–76.)

3 Mädätysprosessin toimintaedellytykset

3.1 Prosessin hallintaan liittyviä tekijöitä

Prosessin seuranta useiden eri parametrien osalta on olennaista häiriöttömän toiminnan varmistamiseksi. Keskityn tässä kohtaa kuvaamaan panostojen kuivaprosessin kannalta olennaisimpia prosessin hallintaan liittyviä tekijöitä. Metaaninmuodostumisen edellytyksenä olennaisimpia tekijöitä prosessissa ovat tietyt olosuhteet, kuten lämpötila, pH sekä inhiboivat tekijät.

3.2 Lämpötila

Lämpötila on keskeinen tekijä biokaasun tuotannossa. Mesofiilisessä prosessissa lämpötila on useimmiten välillä 35–37°C, joka on suomalaisilla laitoksilla yleisin käytössä oleva lämpötila-alue. Termofiilisessä prosessissa lämpötila tulisi olla välillä 50–55 °C. Lämpötilan tasaisuus on keskeinen tekijä prosessin kannalta, sillä metanogeenit ovat herkkiä lämpötilanvaihteluille. Termofiilinen prosessi on mesofiilistä prosessia herkempi lämpötilan vaihteluille. Anaerobisessa hajoamisessa ei juuri itsestään vapaudu lämpöä, sillä energia sitoutuu pääosin metaaniin, joten prosessi tarvitsee ulkoisen lämmönlähteen. Reaktorin lämmitys ja/tai syötteen esilämmitys ovat keinoja tuottaa lämpöä prosessiin. (Latvala 2009, 34; Kymäläinen 2015, 63–64.)

3.3 pH

Mikrobien toiminta on lämpötilan lisäksi riippuvainen pH:sta. Biokaasureaktorin pH on tavallisimmin lähellä neutraalia, vaikkakaan kaikkien prosessin mikrobien kannalta tämä ei ole optimi. pH:n kanssa onkin tehtävä kompromissi, jotta kaikki eri hajoamisvaiheiden mikrobit toimivat. Anaerobisen hajoamisen alkuvaiheen (hydrolyysi ja asidogeneesi) mikrobien toiminta on parhaimmillaan välillä pH 4,5–6,5 ja hajoamisen loppuvaihe (metanogeneesi) vaatii korkeampaa pH:ta, 6,7–7,5. (Latvala 2009, 34; Kymäläinen 2015, 65.) Metanogeeniset bakteerit toimivat siis parhaiten pH-tason ollessa neutraali. Mikäli pH-taso laskee, voi se johtua esimerkiksi orgaanisten happojen pitoisuuden nousemisesta liian korkeaksi. (Dohányos ym. 2001, Virta 2011, 12 mukaan.)

Syöte ja siitä seuraavat happamat ja emäksiset hajoamistuotteet määrittävät tason, jolle biokaasureaktorin pH asettuu. Hiilihydraattipitoiset syötteet alentavat pH:ta hajoamisessa syntyvien happojen takia, proteiinipitoisten syötteiden hajoamisen myötä taas syntyy ammoniakkaa, joka puolestaan nostaa reaktorin pH:ta. (Kymäläinen 2015, 65.)

Metaanin tuoton kannalta keskeiset haponmuodostajabakteerit kärsivät, mikäli reaktorin syöttö on liian suurta ja myös mikäli syötössä ilmenee häiriöitä. Liian suuri orgaaninen kuormitus laskee pH:ta rasvahappojen pitoisuuden noustessa haponmuodostajabakteerien aktiivisuuden lisääntyessä. Vastaavasti häiriöt tai puutteet reaktorin syötössä nostavat pH:ta haponmuodostajabakteerien toiminnan häiriintyessä, mikä saattaa johtaa jopa prosessin pysähtymiseen. Luonnollisesti metaanin tuoton heikentyessä myös biokaasun tuotto ja metaanipitoisuus alenevat. (Latvala 2009, 34.)

3.4 Haihtuvat rasvahapot ja alkaliteetti

Biokaasuprosessin toiminnasta kertovat haponmuodostumisvaiheessa muodostuvat haihtuvat rasvahapot (VFA, Volatile Fatty Acids) ja niiden pitoisuuden muutokset. Mikäli VFA lisääntyy merkittävästi, kertoo se liian suuresta orgaanisesta kuormasta reaktorissa. Liiallinen rasvahappojen määrä inhiboi prosessia. VFA-pitoisuuden tasaisuus kertoo tasaisesti toimivasta prosessista. (Latvala 2009, 36.)

Kymäläisen (2015, 65) mukaan pH-tasoon vaikuttaa reaktorisäällön kyky neutraloida muodostuvia happoja, alkaliniteettiarvolla voidaan mitata tätä puskurointikykyä. Korkea alkaliniteettiarvo kertoo hyvästä puskurointikyvystä ja tällöin on pienempi riski pH-vaihteluihin. Alkaliteetin lasku biokaasuprosessissa kertoo prosessin ylikuormituksesta. Käytännössä biokaasureaktorien alkaliniteettiarvoissa voi olla merkittäviä vaihteluita, välillä 2000–13 000 mgCaCO₃. (Kymäläinen 2015, 65.) Latvalan (2009, 36) mukaan suositeltava taso oli välillä 3500–5000 mg CaCO₃/l. Alkaliteetti voidaan ilmaista myös muodossa mmol/l.

Seuraamalla VFA:n ja kokonaisalkaliteetin suhdetta varmistetaan toimiva hajoamisprosessi. Muutokset prosessissa voidaan tällä tavalla havaita ennen kuin häiriöt prosessissa vaikuttavat pH-arvoon. VFA/alkaliteetti-suhde tulisi olla 0,25 tai alempi. (Latvala 2009, 36.)

3.5 Inhiboivat tekijät

Erilaiset kemialliset tai fysikaaliset tekijät voivat aiheuttaa haittavaikutuksia biologiselle prosessille, jopa niin vakavia, että laitoksessa toimivat organismit kuolevat. Inhiboivia yhdisteitä voi päätyä prosessiin käsiteltävien syötteiden mukana tai ne voivat syntyä hajoamisprosessin välituotteina. Näiden lisäksi myös prosessin väärä lämpötila tai pH tai liiallinen hapen määrä voivat aiheuttaa haittaa prosessille. (Latvala 2009, 36.) Yhdisteiden kielteinen vaikutus prosessiin voi tapahtua erilaisilla pitoisuuksilla. Haitallisuus riippuu myös vallitsevista olosuhteista, kuten lämpötilasta, pH sekä reaktorisäällön koostumus, yhdisteet ja aineet sitoutuvat eri lailla. Eksaktien raja-arvopitoisuuksien määrittäminen onkin vaikeaa. Raja-arvopitoisuuksissa on huomioitava myös vähitellen nousevat haitalliset pitoisuudet, jotka

voivat johtaa myös siihen, että prosessi voi mahdollisesti sopeutua näihin haitallisiin pitoisuuksiin. (Kymäläinen 2015, 67.)

Seurattavia inhiboivia aineita ovat ammoniakki, rikkivety ja rasvahapot, jotka syntyvät hajoamisprosessin yhteydessä. Syötteen ollessa hyvin typpipitoista, on mahdollista, että ammoniakkin inhiboiva vaikutus kasvaa. Tämä on huomioitava erityisesti, jos syötteen typpipitoisuus kasvaa nopeasti. Prosessi sopeutuu hitaasti korkeille ammoniakkipitoisuuksille. (Kymäläinen 2015, 68.)

Rikkivetyä (H_2S) syntyy anaerobisen hajoamisen prosessissa syötteen mukana tulevasta sulfaatista. Yksinkertaisin tapa vähentää rikkivedyn määrää biokaasussa on lisätä pieni määrä happea biokaasureaktoriin. Liiallinen hapen määrän lisääminen inhiboi aneaeobista prosessia ja voi johtaa jopa prosessin pysähtymiseen. Raudan lisäämisellä prosessiin voidaan myös vähentää rikkivedyn pitoisuuksia. Rauta poistuu käsittelyjäännöksen mukana. (Latvala 2009, 42–43.)

Rasvapitoisten syötteiden hajoamisen välituotteet muodostava pitkäketjuisia rasvahappoja, jotka voivat suurina pitoisuuksina inhiboida metanogeenejä ja muita biokaasun muodostumisen prosessin mikrobeja. (Latvala 2009, 36; Kymäläinen 2015, 69.)

4 Biokaasusta liikennepolttoainetta

4.1 Biokaasun jalostaminen

Biokaasua voidaan käyttää jalostamisen jälkeen polttoaineena liikennekäytössä. Jalostamisessa biokaasusta poistetaan hiilidioksidi sekä mahdolliset rikkiyhdisteet. Kaasun sisältäessä enemmän metaania suhteessa hiilidioksiidiin on sen energiasisältö suurempi palautuksessa. Liikennekäytössä käytettävä biokaasu on tyypillisesti 95–98 % metaania. Valmis jalostettu kaasu on rinnastettavissa maakaasuun. Biokaasu paineistetaan noin 200 bariin ja on tällöin tankattavissa ajoneuvoihin, joissa on soveltuva tankki kaasulle. (Latvala 2009, 47).

Biokaasu jalostetaan tavallisimmin hyödyntämällä vesipesutekniikkaa, jossa hiilidioksidi ja rikkiyhdisteet saadaan sitoutumaan veteen. Biokaasu syötetään vesikoloniin noin 10 bar paineessa ja se voidaan edelleen regeneroida erillisessä strippauskolonnissa ja uudelleen hyödyntää vesipesussa. Strippauksella voidaan poistaa komponentteja nestefaasista kaasuvirran tai höyryn avulla. Vesi voidaan myös viemäroidä puhdistettavaksi. Erilaisia kemikaaliliuoksia voidaan käyttää veden sijasta, ja näissä teho on vettä parempi. Vesipesun jälkeen kaasusta poistetaan kosteus ja se paineistetaan varastointia varten useimmiten 200–300 bar. (Latvala 2009, 47.)

Biokaasun jalostamiseen on olemassa useita erilaisia käsittelymenetelmiä. Cozma, Wukovits, Mämälä, Friedl, ja Gavrilescu toteavat artikkelissaan (2014, 373), että tällaisia menetelmiä ovat muun muassa paineen vaihteluun perustuva fysikaalinen adsorptio (pressure swing adsorption, PSA), absorptio (vesipesu, fyysinen tai kemiallinen absorptio) sekä membraanierottelu. Fysikaalinen adsorptio tapahtuu huokoisen väliaineen kautta.

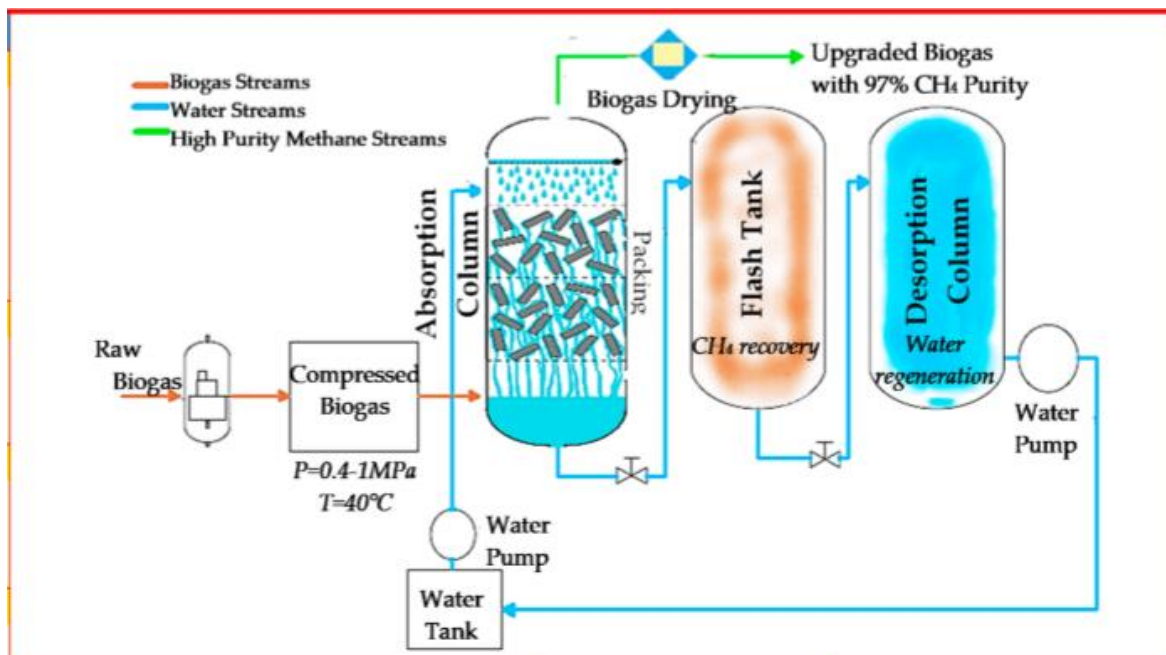
Kaasun absorboituminen veteen perustuu kaasujen liukenemiseen veteen (vesipesu), ja se on hyvin käytetty ja tehokas keino kaasun jalostamiseen, sillä siinä onnistuu sekä hiilidioksidin että rikkiyhdisteiden poisto. (Cozma ym. 2014, 373.) Cvetkovski ja Litonjua esittelevät kirjassaan (2012, 93) biokaasun puhdistamiseen liittyviä menetelmiä. Taulukosta 2 nähdään, että mikäli on tarve poistaa sekä hiilidioksidia että rikkiä, on vesipesu tähän sopiva menetelmä. Vesipesu on myös helpoin menetelmä poistaa jalostettavasta biokaasusta hiilidioksidia, sillä hiilidioksidi on 25 kertaa helpommin veteen liukenevaa kuin metaani. Kaasuyhdistyksen julkaisussa, Biokaasun turvallisuusohje, todetaan, että kaikilla jalostusteknologioilla päästään yli 95 % metaanipitoisuuteen (Kaasuyhdistys).

Poistettu yhdiste	Tekniikka	Menetelmä
CO ₂	Absorptio	Vesipesu, polyetyleeniglykolipesu
	Adsorptio	Hiilimolekyyli-seulat, PSA
	Membraanierottelu	Kaasun permeaatio, kaasuneste membraani adsorptio
H ₂ S	Biologinen rikinpoisto	Rautakloridin tai ilman/hapen lisäys syötteen sekaan
	Adsorptio	Rautaoksidi, aktiivihiihi-suodatus
	Absorptio	Vesipesu, Selexol-pesu, NaOH-pesu
Siloksaanit	Absorptio	Sekoitus hiilivetyjä

Taulukko 2. Biokaasun puhdistamiseen olemassa olevia menetelmiä (mukailtu Cvetkovski & Litonjua 2012, 93)

4.2 Vesipesu

Vesipesussa on siis kyse fysikaalisesta absorptiosta. Prosessissa puristettu biokaasu ohjataan absorptiosäiliön pohjalle virtaavaa vettä vastaan. Kaasu syötetään vesikolonnein 7–10 bar paineessa, jolloin hiilidioksidi ja rikkivety absorboituvat veteen ja puhdistettu metaani poistuu säiliön yläosasta ja kuivataan. Veteen sitoutunut hiilidioksidi desorptoituu, jonka jälkeen käytetty vesi voidaan hyödyntää uudelleen absorptioprosessissa (kuva 2).



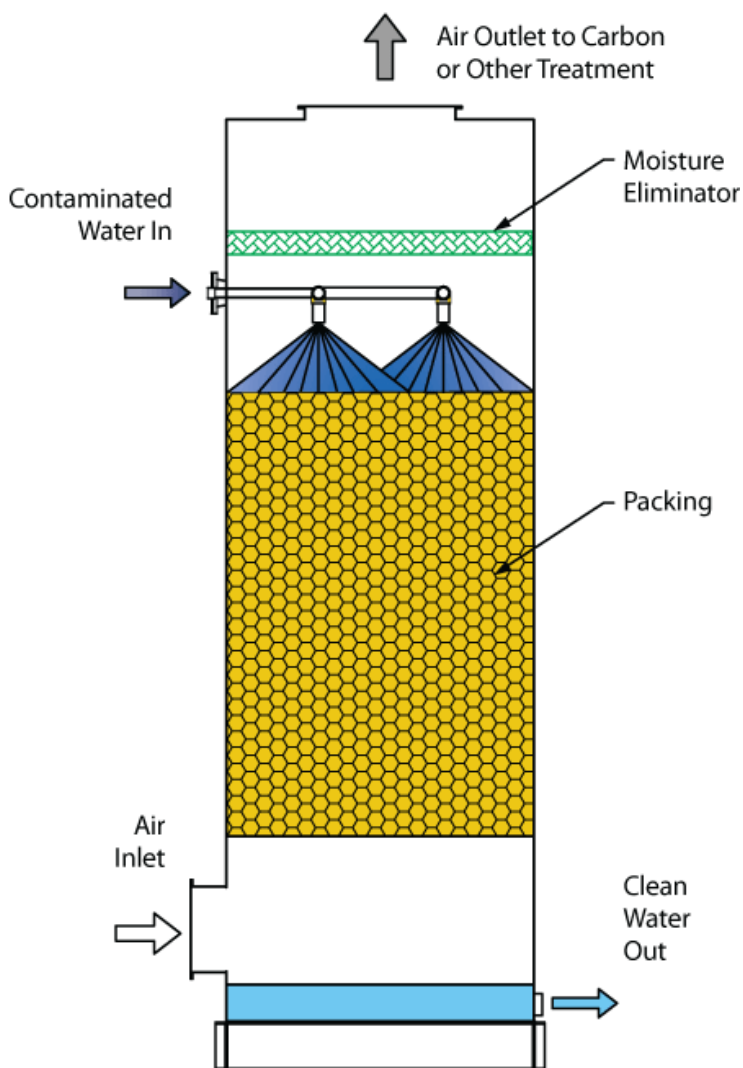
Kuva 2. Esimerkki biokaasun vesipesun prosessikaaviosta (Litonjua & Cbetkovsk 2012)

Yhdisteet voivat absorboitua tai liueta nestemäiseen liuokseen. Vesi on yleisesti käytetty sen edullisten kustannusten, heikon toksisuuden ja helpon saatavuuden vuoksi. Sekä hiilidioksidi että rikkivety liukenevat veteen huomattavasti helpommin kuin metaani. Rikkivety liukenee veteen vielä huomattavasti helpommin kuin hiilidioksidi. Kuitenkin rikkivety voi desorptoitua aiheuttaen päästöjä ja hajuhaittoja, tämän vuoksi voikin olla käytännöllisempää ja ympäristöystävällisempää poistaa rikkivety ennen vesipesua. (Ong, Williams, & Kaffka 2014, 71.)

Vesipesu on yleisesti käytetty tekniikka kaasun puhdistuksessa, sillä sen etuna on sen kyky poistaa samanaikaisesti monia epäpuhtauksia, kuten muun muassa: ammoniakki, rikkidioksidi, orgaaniset hapot sekä siloksaanit (Ong ym. 2014, 71).

Ong ym. (2014, 71) mukaan, kaasumaisten yhdisteiden absorboituminen veteen on suurempaa korkeammilla paineilla Henryn lain mukaisesti. Kun vesipesua hyödynnetään hiilidioksidin poistoon, biokaasu paineistetaan ennen sen ajamista kolonnin pohjalle. Hiilidioksidin kyllästävä vettä poistetaan kolonnin pohjalta ja puhdistettu kaasu poistuu kolonnin yläosasta. Puhdistettu biokaasu sisältää noin 93–98 % metaania, mutta prosessin myötä hukkaantuu 1–2 % metaania. Vesi, johon on imeytynyt hiilidioksidi ja rikkivety, voidaan regeneroida flash-säiliössä, jossa painetta alennetaan, jolloin liuenneet kaasut vapautuvat vedestä. Metaanin heikon veteen liukenemiskyvyn vuoksi, se vapautuu ensin ja voidaan kierrättää takaisin pesukoloniin, ja näin ollen lisätä biokaasun metaanipitoisuutta.

Rikki- ja hiilidioksidipitoinen vesi voidaan myös ohjata strippauskolonniin rikkivedyn ja hiilidioksidin poistamiseksi. Kolonniin ohjataan alaosasta ilmaa ja käsiteltävä neste syötetään kolonnin yläosasta. Ilmavirta on alhaalta ylöspäin. Strippauskolonneissa käytetään usein täytekappaleita lisäämään kontaktipinta-alaa ja -aikaa (Paavola & Kapuinen 2015, 104).



Kuva 3. Strippauskolonnin toimintaperiaate (Monroe Environmental)

Rikkivety voi aiheuttaa veden regeneroimisessa putkien tukkeutumista. Puhdistettu vesi kiertää takaisin vesipesuprosessiin. Poistokaasu, joka ohjataan siis ulkoilmaan sisältää bio-kaasusta poistetun rikkivedyn ja hiilidioksidin. Poistokaasu on mahdollista käsitellä regeneroitavalla lämpöoksidaatiolla tai liekittömällä oksidaatiolla rikkivety päästöjen ehkäisemiseksi. Flash- tai strippauskolonnit eivät täysin onnistu regeneroimaan käytettävää vettä, joten vesi tulee vaihtaa asteittain ajan myötä. Mitä enemmän hiilidioksidia absorboituu

pesukolonniissa, alkaa paine laskea siellä, jolloin hiilidioksidin liukeneminen vaikeutuu. Tämän vuoksi tarvitaan suuri veden virtausnopeus pienempienkin hiilidioksidipitoisuuksien imeyttämiseksi. (Ong ym. 2014, 72.)

Biokaasu sisältää pieniä pitoisuuksia itiöitä muodostavia bakteereita. Jotta estetään mahdolliset biologisen kasvuston muodostamat tukkeumat, tulisi vesipesuri pestä pesuaineella useita kertoja vuodessa. Kun kaasusta poistetaan suuria määriä rikkivetyä tai hiilidioksidia, tulee tankkien ja putkiston olla ruostumatonta terästä, jotta vältetään korroosiolta. (Ong ym. 2014. 73.)

4.3 Kaasun hajustaminen

Jalostettu kaasu on hajutonta. Kaasuvuotojen huomaamiseksi kaasu on hajustettava, ennen kuin sen pitoisuudet ilmassa nousevat vaarallisiksi. Jalostettu biokaasu on palavaa kaasua ja se voi aiheuttaa riskin vuototilanteista, syttymiseen, tulipaloihin, räjähdysiin sekä häikämyrkytsvaaraan. (Tukes.)

Kauppa ja teollisuusministeriön päätöksessä maakaasuasetuksen soveltamisesta 1058/93 määrätään maakaasun hajustamisesta. Hajusteainetta on oltava maakaasussa niin, että kaasu voidaan aistia, silloin kun sen pitoisuus ilmassa on vähintään viidesosa kaasun alemmasta syttymisrajasta. Kaasun hajustamiseen käytetään tetrahydrotiofeenia tai ominaisuuksiltaan vastaavaa hajusteainetta. Kuutiometriin maakaasua tulee sekoittaa 10 mg tetrahydrotiofeenia. Hajusteaineen annosteluun käytettävä laitteisto tulee olla käyttötarkoitukseltaan soveltuvia. Hajusteaineen määrää kaasussa on valvottava säännöllisin väliajoin. Hajusteaineen kulutusta on verrattava kuluneeseen kaasumäärään. Hajusteaineen pitoisuuden riittävyys maakaasuputkiston loppupäässä on todettava kerran vuodessa. Virtaavasta maakaasusta otetaan näyte ja se analysoidaan esimerkiksi kaasukromatografialla. Kaikista maakaasun hajusteaineen mittauksista on pidettävä pöytäkirjaa.

Tukesin sivuilla todetaan, että jalostettua biokaasun jakelua, käyttöä ja tankkaustoimintaa koskevat samat vaatimukset kuin maakaasuakin. (Tukes.) Hajusteaine tulee olla aistittavissa, kun kaasupitoisuus on 20 % alemmasta syttymisrajasta (Kaasuyhdistys).

Valtioneuvoston asetusta maakaasun käsittelyn turvallisuudesta 551/2009 sovelletaan myös biokaasun tekniseen käyttöön, biokaasun talteenottoon, siirtoon, jakeluun ja käyttöön tarkoitettuihin putkistoihin ja laitteistoihin. Tankkausasemalla käsiteltävän maakaasun tulee olla aina hajustettua.

5 Palopuron biokaasulaitos

5.1 Laitoksen kuvaus

Palopuron biokaasulaitos ja sen yhteydessä toimiva Nivos Energia Oy:n omistama tankkausasema toimivat Hyvinkäällä, Uudellamaalla. Laitoksen on toimittanut Metener Oy, joka on rakentanut myös Suomen ensimmäisen täyden mittakaavan kuivämädätyslaitoksen vuonna 2014 (Metener Oy 2016, 5). Palopuron Biokaasun osakkaina ovat Nivos Energia Oy, Knehtilän tila, Metener Oy sekä Lehtokummun tila. Palopuron Biokaasu Oy tuottaa biokaasun sekä myy jalostetun liikennekaasun Nivos Energia Oy:lle.

Laitoksella käsitellään syötteenä viherlannoitusnurmea, suojavyöhykenurmea sekä hevosien ja kanan kuivalantaa. Syötteinä hyödynnetään maatalouden sivuvirtoja, joille ei olisi käyttöä esimerkiksi karjan rehuna. Biometaanin tuotanto on Energiaviraston hyväksymän ja valvoman kestävyysjärjestelmän piirissä. Biopolttoaineiden, bionesteiden ja biomassapolttoaineiden kestävyys tulee osoittaa biopolttoaineista, bionesteistä ja biomassapolttoaineista annetun kestävyyslain (393/2013) mukaisesti (Energiavirasto). Kestävyysjärjestelmän mukainen toiminta todennetaan ulkopuolisen todentajan toimesta vuosittain ja raportoidaan Energiavirastolle.

Laitos sisältää raaka-ainelaatan, kaksi 1000 m³ mädättämisreaktoria, perkolaatiosäiliön (kuivan pieni kaasuvarasto), kaasuvaraston, kattilahuoneen sekä jalostuslaitteiston (kuva 4). Biokaasuprosessissa syntyvää biokaasua hyödynnetään liikennepolttoaineena sekä lämmöntuotannossa.



Kuva 4. Palopuron Biokaasu Oy:n biokaasulaitos (Nivos Energia Oy)

Laitoksella tuotettu luomubiokaasu on tankattavissa laitoksen läheisyyteen rakennetulla biokaasun tankkausasemalla (kuva 5). Tankkausaseman toiminta käynnistyi tammikuussa 2019. Kyseessä on Suomen ensimmäinen luomubiokaasun tankkausasema. Biokaasun tuotantoprosessissa syntyvä mädätysjäännös sekä rejektivedet hyödynnetään lannoitteena Knehtilän luomutilalla.



Kuva 5. Biokaasun tankkausasema Palopurossa, Hyvinkäällä (Nivos)

5.2 Laitoksen toiminnan kuvaus

Kuivamädätysprosessi on Suomessa vielä melko vähän käytetty biokaasun tuotannon prosessi. Panosreaktorin syötteet vaativat pitkät viipymät, sillä ne ovat hitaasti hajoavia biomassoja. Nurmi, olki ja hevosen lanta omaavat korkean kuiva-ainepitoisuuden, mutta ne sulavat erittäin hitaasti. Panosmädätys sopiikin tällaisten jakeiden mädätykseen, jotka eivät sovi muille reaktorityypeille. Metener Oy omistaa kyseisen panostoimisen prosessin patentin. (Metener 2018.)

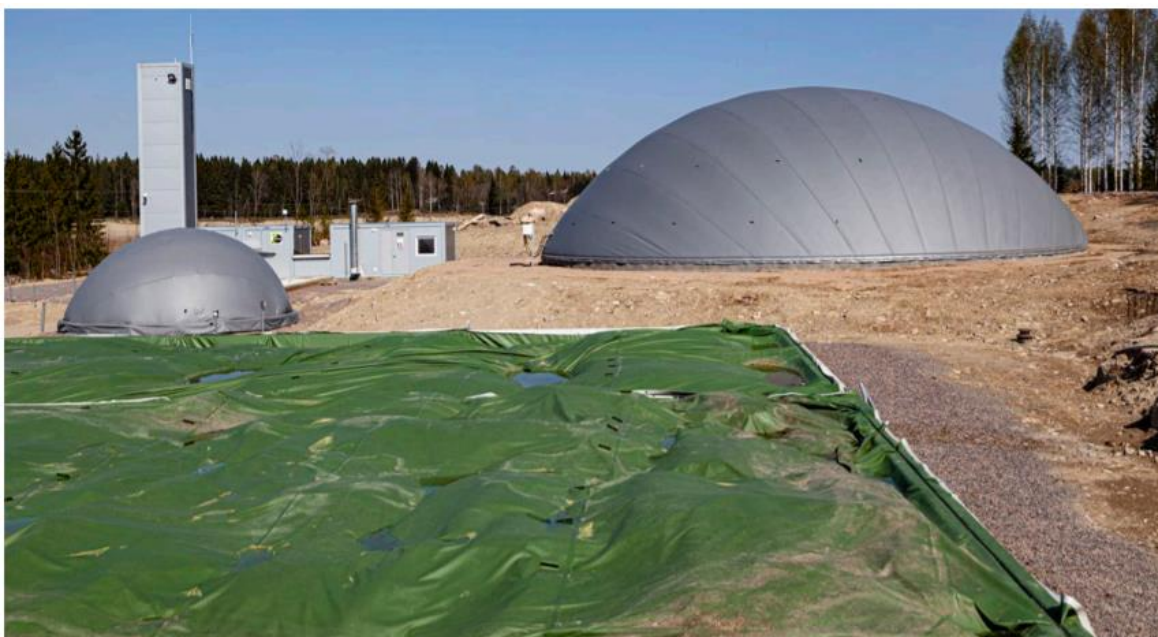
Panosreaktoreiden syötemassat vaihdetaan noin kolme kertaa vuodessa per reaktori. Reaktorin tyhjennys ja täyttö tehdään kaivinkoneella. Syötteenä käytetään nurmea sekä hevosen ja kanan lantaa. Täytön jälkeen reaktori suljetaan kaasutiiviiksi pressulla. Tarvittaessa laitoksella voidaan varastoida 12 kuukauden tarpeisiin raaka-ainetta sille tarkoitetulla raaka-ainelaatalla. Raaka-aineet säilytetään tiivistettynä ja ilmatiivisti.

Reaktoreihin syötetään biomassan sekaan lämmintä mikrobipitoista perkolaationestettä, tällaisia reaktoreita kutsutaan suotopetireaktoreiksi (leach bed reactor). Neste lämmittää biomassan tarvittavaan prosessilämpötilaan (mesofiilinen alue 35–42°C), ja perkolaatti

liuottaa orgaanista ainetta hajotettavaksi perkolaatiosäiliöön, jossa biokaasua edelleen muodostuu. Reaktoreissa syntyvä biokaasu pumpataan perkolaatiosäiliön kautta joko jalostukseen, prosessin lämmitykseen käytettävälle kattilalle taikka kaasubarastoon.

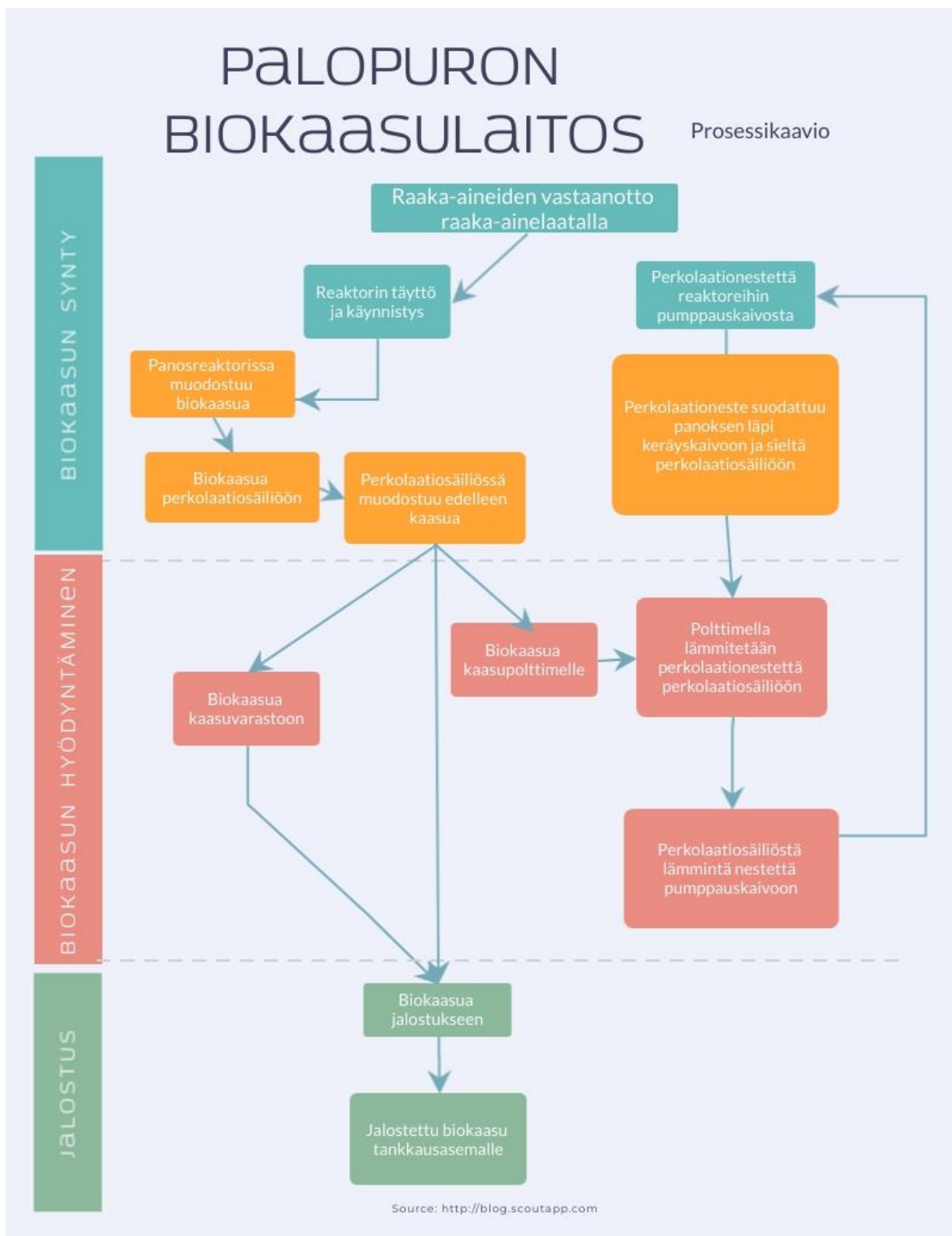
Kaasubarastoon kerääntyy raakabiokaasua, mikäli biokaasua syntyy enemmän, mitä jalostus tai kattila kuluttavat. Kaasubarasto toimii myös häiriötilanteissa kaasun sijoituspaikkana, mikäli jalostuksessa ilmenee ongelmia.

Kuvassa 6 etualalla on panosreaktorit, iso kupu on kaasubarasto, pienempi kupu on perkolaatiosäiliö ja taustalla näkyy kattilahuone sekä jalostusyksikkö.



Kuva 6. Palopuron biokaasulaitos (Kaasuyhdistys, 7)

Perkolaationesteen lämmitys tapahtuu raakabiokaasua hyödyntävän lämmityskattilan avulla. Neste pumpataan reaktoreihin automatisoidulla pumppauksella. Perkolaationesteen kierto on kuvattu tarkemmin kappaleessa 6.2 Perkolaationesteen kierto. Biokaasun tuotanto on kuvattu yksinkertaistettuna kuviossa 3.



Kuvio 3. Palopuron biokaasulaitoksen prosessikaavio

Liikennekäyttöä varten raakabiokaasu on jalostettava >95 %. Laitoksen toimittajalla, Metener Oy: llä, on patentti jalostimeen, joten tässä opinnäytetyössä ei käydä seikkaperäisesti läpi jalostuksen toimintaa. Jalostimella kaasusta vesipesua hyödyntämällä saadaan

putsattua suuri osa hiilidioksidista sekä muista epäpuhtauksista, niin että metaanipitoisuus nousee yli 95 %. Tankkausasemalla kaasu paineistetaan 200 bar. Kaasu kuivataan ja hajujustetaan ennen sen siirtämistä tankkausasemalle.

6 Mädätysprosessin hallinta Palopurolla

6.1 Panoksen vaihto

Palopuron biokaasulaitoksella on kaksi kuivamädätysreaktoria. Tavoitteena on, että kaasuntuotanto saadaan pysymään mahdollisimman tasaisella tasolla reaktoreiden ollessa rinnakkain käytössä. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että silloin kun toisen reaktorin panosta ollaan vaihtamassa tai se on mädätysprosessin alkuvaiheessa, jolloin kaasuntuotanto ei vielä ole kunnolla käynnistynyt, on toinen panos tällöin aktiivisessa kaasuntuotantovaiheessa. Panosten vaihdosta on tehty vuosikello yhtiön sisäiseen käyttöön. Vuosikellossa on etukäteissuunnitelmat panosten vaihdon sykliin. Kukin panos vaihdetaan noin neljän kuukauden välein, tällöin syötteenä valittu materiaalin kaasuntuotto on laskenut metaanipitoisuuden ohella niin alhaiseksi, että panos on vaihdettava.

Palopuron biokaasulaitoksen reaktoreiden syötteenä käytetään nurmen lisäksi kanan -ja hevosenantaa, reaktorin pohjalle laitetaan haketta estämään panoksen liiallinen tiivistyminen sekä edesauttamaan salaojitusta. Syötteiden määrä kerätään kirjanpitoa varten taulukoon. Nurmisyöte tulee läheiseltä Knehtilän luomutilalta. Hevos- ja kananlantaa otetaan vastaan sopimustoimittajilta. Raaka-aineet varastoidaan raaka-ainelaatalla ilmatiivisti ennen syöttämistä prosessiin.

Pumppaukset reaktoriin on syytä lopettaa jo muutamaa päivää ennen panoksen vaihdon aloittamista, jotta vältetään liian märältä mädätteeltä.

6.2 Perkolaationesteen kierto

Panostoimisessa kuivaprozessissa syöttestä irtoaa ravinnepitoista vettä, jota kutsutaan perkolaationesteeksi. Perkolaationesteen tulee olla riittävän lämmintä (+35 – + 38 °C), jotta mesofiilinen prosessi toimii.

Nestettä suihkutetaan panosten päälle, mistä se suodattuu reaktorin alaosaan. Suodattu neste siirtyy reaktoreiden pohjalta erilliseen keräyskaivoon, josta perkolaationeste menee lämmönvaihtimelle.

Perkolaatiosäiliöön kiertävää nestettä lämmitetään biokaasua hyödyntävällä kattilalla. Perkolaatiosäiliöstä neste siirtyy pumppauskaivoon, ja tästä edelleen reaktoreihin suodattumaan mädätteen läpi reaktoreiden läpi ja edelleen keräyskaivoon.

6.3 Määtysprosessin tilan seuranta

Automaatiojärjestelmän avulla voidaan seurata laitoksen toimintaa reaaliaikaisesti. Prosessihallinnan lisäksi automaatiojärjestelmällä taataan turvallinen laitoksen toiminta. (Kymäläinen 2015, 75.) Automaatiolla seurataan esimerkiksi reaktorin kaasun virtaamia, kaasun koostumusta (metaani, hiilidioksidi, rikkivety ja happi), nesteiden pinnankorkeuksia, reaktoreissa ja kaasuvälikameroissa olevaa painetta sekä biokaasun kertymistä. Laitoksen parametrien syvälinen ymmärtäminen on osa turvallista ja mahdollisimman häiriötöntä laitostoimintaa.

Prosessin tilan analysointia on syytä tehdä myös laboratorioanalyysien avulla. Näytteenotto tulee tehdä systemaattisesti samalla tavalla sekä sopivia menetelmiä käyttäen. Näytteiden tulee olla edustavia ja näytteenottajan tulee olla tähän tehtävään hyvin perehdytetty. Seurattavia näytteitä ovat reaktorin perkolauksenesteestä pH, VFA- ja alkaliniteetti, ammoniakki, COD, TS ja VS (Kymäläinen 2015, 76). Kymäläisen (2015, 76) mukaan pH-arvon seuranta ei kerro riittävän nopeasti mahdollisista prosessihäiriöistä, vaan on tärkeää seurata alkaliniteetti- ja VFA-mittauksia. Erityisen tärkeitä laboratorioissa tehtävät analyysit ovat prosessin muutosvaiheissa, tällaisia ovat syöte- ja kuormitusmuutokset sekä prosessin ylösajovaihe.

6.3.1 Seurattavat parametrit

Palopuron biokaasulaitoksen kunnossapitojärjestelmänä on Ahjo, johon merkitään seurattavia parametritietoja sekä laitoksen kunnossapitoon liittyviä seikkoja. Laitoksella käydään tekemässä käytönvalvonnan kierrokset kahdesti viikossa, jolloin käytönvalvoja käy läpi laitoksella seurattavia parametreja sekä tarvittavia huoltotoimia. Automaationohjausjärjestelmänä on Unitronics. Automaatiota voidaan ohjata laitokselta sekä etäyhteydellä Unitronicsin kautta. Taulukoihin 3 ja 4 on kerätty seurattavien parametrien tietoja biokaasulaitoksen osalta, minkälaisia yksiköitä parametriä tarkastellessa käytetään, mistä parametri kertoo sekä mistä arvo on luettavissa. Raja-arvoja julkaistavaan versioon ei laitostoimittajan toiveesta laiteta, vaan ne on lisätty työn tilaajalle laitettavaan versioon liitteeksi.

Taulukon laatimista varten haastattelin Metener Oy:n Juha Luostarista ja sekä Nivos Palvelut Oy:n Joonas Mäntystä, joka on tiiviisti mukana Palopuron Biokaasu Oy:n toiminnassa asiantuntijan ja käytönvalvojan roolissa.

Parametri ja yksikkö	Seuranta
Reaktoreiden nesteen pinnan korkeudet cm	Voidaan seurata nestepinnan tasoa reaktoreissa. Mittaukset reaktoreiden etu- ja takaosassa. Laitoskierrosten yhteydessä tarkastetaan reaktorin etuosa. Nesteen kierto varmistettava. Seurattavissa Unitronicsista. Kirjaukset Ahjoon laitoskierrosten yhteydessä.
Kaasun virtaus reaktoreista m ³ /h	Molemmille reaktoreille omat mittaukset. Säädelään reaktoreiden painetta kaasun tuottonopeuden mukaisesti. Puhaltimen taajuusmuuttajalle säädetään kiinteä puhaltimen käymistaajuus. Säädetään: on/off. Säädetyn taajuuden suuruuteen vaikuttaa reaktorin paineiden raja-arvot ja reaktorin kaasun tuotto. Seurattavissa Unitronicsista.
Panosreaktorin paineen mitaus Pa	Kaasu saadaan siirrettyä sitä mukaan pois, kun sitä syntyy. Pidetään ilmakehän paineessa. Pidetään alipaineisina, jotta happi korvaa rikkivetyä reaktorissa. Reaktorin painemittaus. Kertoo reaktorissa olevan paineen. Seurattava Unitronicsista.
Kaasun kertymä panosreaktoreissa m ³ /vrk	Panoksen vaiheen arvioitiin, onko saanto jo saatu. Molemmista reaktoreista mittaukset kaasun kertymälle vuorokaudessa. Seurattava Unitronicsista.
Reaktoreista tulevan kaasun pitoisuudet %	Metaanin pitoisuus kertoo, milloin panos on otettavissa käyttöön. Rikkivetypitoisuus kertoo alipaineen toimivuudesta. Happi kertoo mahdollisista häiriötilanteista. Pitäisi näkyä vain ensimmäisenä reaktorin sulkemispäivänä. Mittauksissa mukana myös happi O ₂ , hiilidioksidi CO ₂ . Rikkivetypitoisuusmittaus tulossa. Ahjoon merkitään metaanipitoisuus CH ₄ . Unitronicsista seurattavissa myös muiden kaasujen pitoisuudet.
Puskurisäiliön pinta cm	Puskurisäiliöön kertyy sadevedet raaka-ainelaatan edessä olevasta sadevesikäivosta. Pinnan ollessa liian korkealla on puskurisäiliötä tyhjennettävä. Perkolaatiosäiliön nestepinnan ollessa liian matala pumpataan puskurisäiliöstä lisää nestettä perkolaatiosäiliöön. Perkolaatiosäiliön pinnan ollessa liian korkealla siirtyy nestettä puskurisäiliöön.
Keräyskaivon pH	Suotuvan nesteen pH. Kertoo panoksen kypsyydestä. pH alkaa nousta metaanintuoton myötä. Luettavissa Unitronicsista. Kirjaus Ahjoon laitoskierrosten yhteydessä.
Pumppauskaivon pH	Orgaaniset hapot täytetään perkolaatiosäiliössä, eli on hiukan emäksisempää kuin keräyskaivossa. Luettavissa Unitronicsista. Kirjaus Ahjoon laitoskierrosten yhteydessä.
Keräyskaivon lämpötila °C	Kertoo panosten lämpötilasta, luettava arvo on keskiarvo molemmista panosreaktoreista.
Perkolaatioaltaan lämpötila °C	Pumppauksen määrä vaikuttaa lämpötilaan. Pumppauksen ollessa vähäisiä esimerkiksi reaktorin käynnistyessä, nousee säiliön lämpötila. Kattilapiirin lämpötila vaikuttaa perkolaatioaltaan lämpötilaan. Luettavissa Unitronicsista. Kirjaus Ahjoon.

Taulukko 3. Biokaasulaitoksen seurattavat parametrit ja niiden yksiköt

Parametri ja yksikkö	Seuranta
Perkolaatioaltaan paine Pa	Kertoo, onko perkolaatioaltaan päällä oleva kaasuväkä täynnä. Ilmanpainepuhaltimella oleva paine on sama. Kertoo kaasun kertymästä perkolaatiosäiliössä. Luettavissa Unitronicsista.
Biokaasun kertymä m ³	Käyttöön menevä kaasu mitataan perkolaatiosäiliöstä lähtiessä. Perkolaatiosäiliössä sekoittuu panosten ja säiliön kaasut. Unitronicsin näytöltä luettavissa kokonaiskertymä. Kirjaus Ahjoon laitoskierrosten yhteydessä.
Reaktori 1 kertymä m ³	Unitronicsin näytöltä luettavissa kokonaiskertymä käytössä olevan panoksen ajalta. Kirjaus Ahjoon laitoskierrosten yhteydessä.
Reaktori 2 kertymä m ³	Unitronicsin näytöltä luettavissa kokonaiskertymä käytössä olevan panoksen ajalta. Kirjaus Ahjoon laitoskierrosten yhteydessä.
Kaasuväkä CH ₄ %	Voidaan arvioida kaasun käyttökelpoisuutta, niin että polttimet toimivat. Kaasuväkässä olevan biokaasun metaanipitoisuus. Unitronicsista luettavissa. Kirjaus Ahjoon laitoskierrosten yhteydessä.
Kaasuväkäksen paine Pa	Identtinen perkolaatiosäiliöön nähden. Painetietoja voi käyttää naruanturin kalibrointiin. Kertoo kaasuväkäseen kertyvän kaasun määrästä. Unitronicsista luettavissa.
Kaasuväkässä olevan kaasun määrä	Narumittaus, voidaan kalibroida painemittauksella tarvittaessa. 0–100 %. Kuvaa kaasun määrää koko kaasuväkäsen tilavuudesta. Luettavissa Unitronicsista.
Kaasuväkäsen puhaltimen paine N/m ²	Talvella nostetaan lumen takia ja kesällä pidetään pienemmällä. Mitä pienempänä paineet pitää, niin sen pienempi on kaasuväkäsen riski. Kirjaus Ahjoon laitoskierrosten yhteydessä.
Perkolaatiosäiliön puhaltimen paine N/m ²	Talvella nostetaan lumen takia ja kesällä pidetään pienemmällä. Mitä pienempänä paineet pitää, niin sen pienempi on kaasuväkäsen riski.

Taulukko 4. Biokaasulaitoksen seurattavat parametrit ja niiden yksiköt

6.3.2 Laboratorioanalyysit

Prosessinseurannan tukena voidaan käyttää laboratorioanalyysieja. Tässä kappaleessa käsitellään panostoimisen kuivaprosessin kannalta keskeisimpiä laboratorioanalyysieja. Palo-puron Biokaasu Oy:lla on mahdollista teettää laboratoriotutkimuksia joko Nivoksen omissa

tiloissa tai vaihtoehtoisesti näytteet voidaan lähettää ulkopuoliseen laboratorioon tutkittaviksi.

VFA:n eli haihtuvien rasvahappojen pitoisuus tulisi pysyä mahdollisimman tasaisena, tällöin prosessin toimivuus on kohdallaan. Tarvittaessa voidaan selvittää yksittäisten VFA-yhdisteiden pitoisuuksia, tällöin tehdään kaasui- tai nestekromatografinen (GC tai HPLC) määrittäminen. (Latvala 2009, 34; Kymäläinen 2015, 76).

COD eli kemiallinen hapenkulutus kuvaa näytteen orgaanisen aineksen määrää. COD-määrittäminen voidaan tehdä pikamenetelmällä (muun muassa Hach-Lange). COD:issa oleva orgaaninen aine sisältää myös kaikki VFA-yhdisteet, joten COD- sekä VFA-arvot ovat yleensä suoraan riippuvaisia toisistaan.

Alkaliniteetti kuvaa puskurikapasiteettia eli emästen kykyä neutraloida hapot. VFA/alkaliniteetti suhde kuvastaa prosessin tilaa, ja tätä seuraamalla voidaan reagoida mahdollisiin häiriöihin nopeammin kuin vain pH-arvoa seuraamalla, pH-arvo kun reagoi häiriöihin hitaammin. (Kymäläinen 2015, 79.)

Epäorgaaninen typpi esiintyy biokaasuprosessissa pääasiassa ionisoituneessa ammonium-muodossa (NH_4). Epäorgaanista typpeä muodostuu orgaanisten typpi-yhdisteiden hajotessa. (Latvala 2009, 36). Ammoniakin (NH_3) inhiboiva vaikutus tapahtuu ammoniumia selvästi pienemmissä pitoisuuksissa. Ammoniakin suhteellinen osuus kasvaa pH:n ja lämpötilan kasvaessa. Käytännössä ammoniakki aiheuttaa inhibiotta prosessille syötteen typpipitoisuuden kasvaessa nopeasti. Kuivapanosreaktorissa tämä tarkoittaa käytännössä alkuvaiheen korkeampia pitoisuuksia. Inhibiotta aiheuttavista pitoisuuksista on julkaistu runsaasti tutkimustietoa, tulokset näissä kuitenkin vaihtelevat. (Kymäläinen 2015, 68.)

6.4 Perkolaationesteen ja mädätteen sijoitus

Panoksen vaihdon yhteydessä saadaan ravinnerikasta lannoitetta maatalouden käyttöön. Mädätysjännöstä ei kuivata, vaan se hyödynnetään sellaisenaan lannoituksessa. Lisäksi perkolaationestettä laimennetaan noin kerran vuodessa, jolloin perkolaatiosäiliöstä pumpataan loka-autolla nestettä, joka voidaan hyödyntää peltojen lannoittamiseen.

Lakisääteisesti mädäte on levitettävissä 15.4.–15.10. välisenä aikana. Palopuron Biokaasun reaktoreista saatavat mädätysjännökset sekä perkolaationeste levitetään vieressä sijaitsevan Knehtilän luomutilan pelloille. Mikäli levitys ei ole mahdollista, voidaan mädätysjännös varastoida aumassa ja rejektivesi on mahdollista kuljettaa ympäriksi esimerkiksi toiselle biokaasulaitokselle.

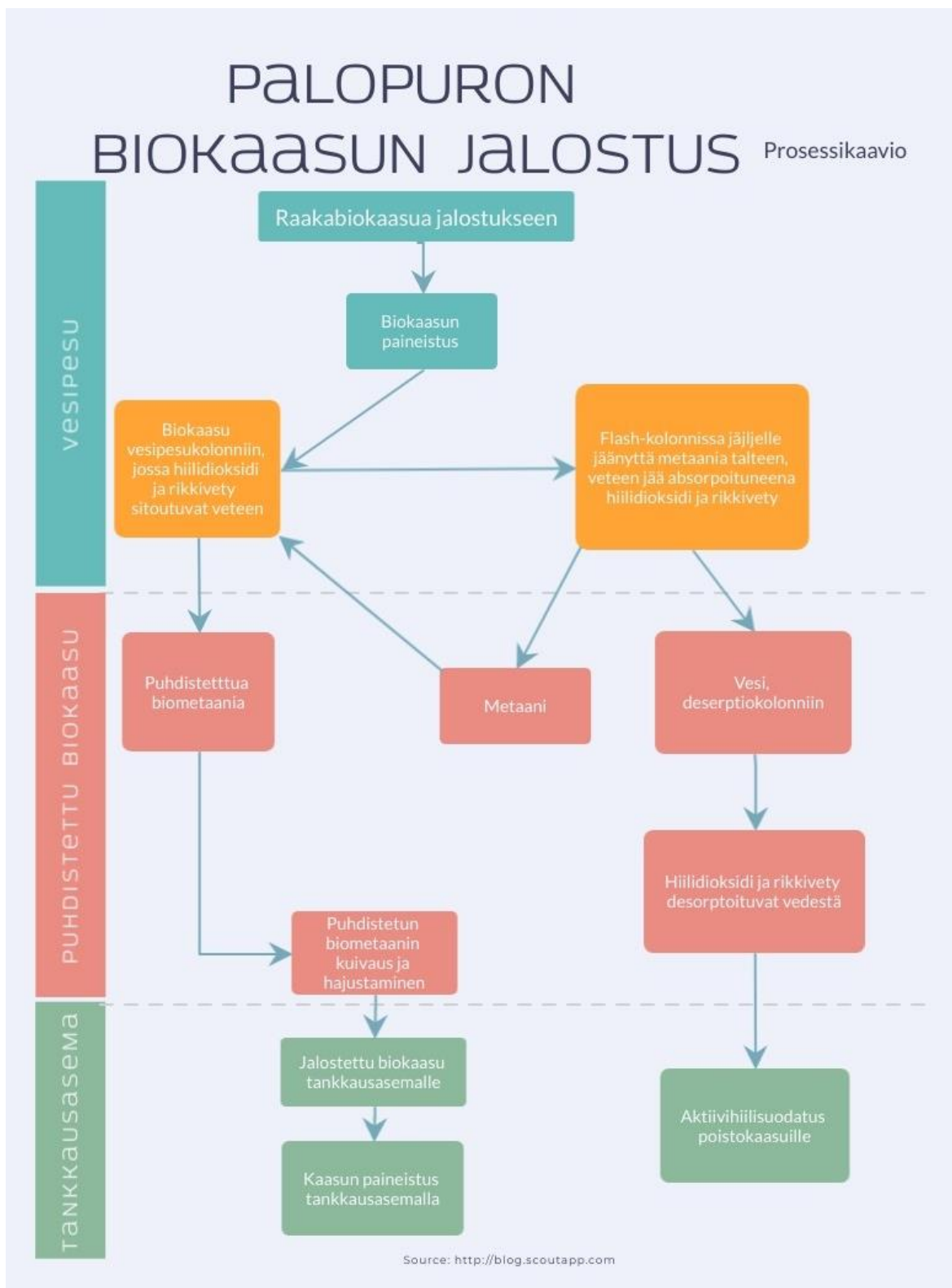
7 Biokaasun hyödyntäminen Palopurolla

7.1 Biokaasun jalostaminen

Biokaasun jalostamiseen on olemassa monia erilaisia menetelmiä. Palopuron biokaasulaitoksella hyödynnetään fysikaaliseen absorptioon perustuvaa vesipesutekniikkaa. Jalostuksen laitteiston sekä prosessisuunnittelun, sekä biokaasulaitoksen sekä tankkausaseman on toimittanut suomalainen Metener Oy. Laitostoimittaja omistaa jalostuksen patentin, joten opinnäytetyössä ei käsitellä jalostukseen liittyviä asioita seikkaperäisesti.

Raakabiokaasu, joka sisältää tässä vaiheessa noin 50–70 % metaania, ohjataan jalostukselle, jossa kaasu paineistetaan ja ohjataan vesipesurille. Vesipesussa kaasusta poistuu suurin osa kaasun sisältämästä hiilidioksidista ja rikkivedystä. Kaasu kuivataan ja hajustetaan tetrahydrotiofeenilla. Jalostettu biokaasu pääsee siirtymään tankkausasemalle, mikäli sen metaanipitoisuus ylittää 95 %.

Veteen sitoutuneet hiilidioksidi ja rikkivety voidaan poistaa laskemalla desorptiokolonnissa paine ja ohjaamalla kolonnin alaosaan ilmaan, jolloin hiilidioksidi ja rikkivety ohjautuvat kolonnin yläosasta aktiivihiiisuodatuksen jälkeen korkean poistoilmapiipun kautta ulkoilmaan. Aktiivihiiisuodatus poistaa rikkivedyn aiheuttamia hajuhaittoja. Prosessi on kuvattu yksinkertaistettuna kuviossa 4.



Kuvio 4. Palopuron Biokaasun jalostuksen prosessikaavio

7.2 Seurattavat parametrit

Taulukkoon 4 on kerätty jalostukseen liittyviä parametreja. Raja-arvoja julkaistavaan versioon ei tässä kohtaa laiteta laitostoimittajan pyynnöstä, vaan ne ovat liitteenä työn tilaajalle toimittavassa versiossa. Seuraaviin taulukoihin (5 ja 6) on kerätty seurattavien parametrien tietoja jalostuksen osalta, minkälaisia yksiköitä parametriä tarkastellessa käytetään, mistä parametri kertoo sekä mistä arvo on luettavissa.

Parametrien selvittämiseksi haastattelin Metener Oy:n Juha Luostarista. Laatumiseen olen saanut asiantuntija-apua Nivos Palvelut Oy:n Joonas Mäntyseltä sekä Timo Rautamalta, jotka molemmat työskentelevät Palopuron biokaasulaitoksen asiantuntijoina ja käytönvalvojina.

Parametri ja yksikkö	Seuranta
Jalostetun kaasun metaanipitoisuus %	Laadunvarmistukseen käytettävä. CH ₄ Tankkausasemalle lähtevän kaasun metaanipitoisuus. Seurattavissa Unitronicsista. Kirjaus Ahjoon.
Jalostuksen käyttötunnit	Huoltojen seurantaan. Seurattavissa Unitronicsista. Kirjaus Ahjoon
Prosessiveden virtaus m ³ /h	Prosessiveden virtaama jalostuksen ollessa käynnissä. Prosessiveden virtausnopeudella pystytään vaikuttamaan jalostustehokkuuteen ja energian kulutukseen. Tavoitteena pitää arvo samana, jotta voidaan seurata mahdollisia häiriöitä. Virtausnopeutta säädetään pumpun P402 taajuusmuuttajalta.
Prosessiveden lämpötila °C	Hiilidioksidi liukenee paremmin kylmään veteen. Kertoo myös kylmäkoneen toimivuudesta.
Poistokaasupuhaltimen virtausnopeus m/s	Desorptio ei toimi riittävällä tasolla, jos virtausnopeus on liian pieni eikä jalostus toimi riittävän hyvin, jos vettä ei päästä elvyttämään riittävän hyvin.
Raakakaasun virtausnopeus m ³ /h	Jalostimella ei omaa lukemaa, laitoksella luettavissa.
Jalostuksen käyttötunnit	Jalostuksen käyttötuntien kokonaismäärä. Määräaikaishuollot on määritely jalostuksen käyttötuntien mukaan. Seurattavissa Unitronicsista. Kirjattava Ahjoon.
Vuotoanturin LEL-lukema %	Jalostustilassa olevan vuotoanturi ilmaisee tilassa olevan metaanin alemman syttymisrajan prosenttilukeman. Seurattavissa Unitronicsista. Kirjattava Ahjoon.
Prosessitilan lämpötila °C	Tilassa oltava plusasteet. Seurattavissa Unitronicsista. Kirjattava Ahjoon.
Prosessivesisäiliön pinta cm	Kertoo vuodosta, jos vettä häviää. Seurattavissa Unitronicsista. Kirjattava Ahjoon.
Jalostetun kaasun metaanipitoisuus CH ₄ %	Tankkausasemalle menevän jalostetun kaasun metaanipitoisuus. Metaanipitoisuuden ylittäessä 95 % kaasua alkaa siirtymään tankkausasemalle.

Taulukko 5. Jalostuksen seurattavat parametrit ja niiden yksiköt

Parametri ja yksikkö	Seuranta
Kaasuvirtauslaskuri m ³	Kertoo tuotetun kaasun määrän. Luettavissa Unitronicsista. Kirjattava Ahjoon.
Vedenkulutuslaskuri m ³	Luettavissa Unitronicsista. Kirjattava Ahjoon.
Kuivaimet A ja B min	Syklit lyhenevät, kun kuiva-aine väsy. Kuiva-aineiden vaihto noin ker- ran vuodessa. Kuivainten elvytykseen käyttämä minuuttiaika.
Kastepiste °C	Kaasun käytön kannalta olennaista, että kaasu on tarpeeksi kuivaa. Kastepiste kertoo kuivaimelle, milloin pitää vaihtaa toiseen kuivaimeen.
Jalostuksen käyntiaika h/ min	Kertoo sen, kauanko jalostus on ollut käynnissä edellisestä käynnisty- misestä lähtien.
Paineilman paine Bar	Mitataan välillisesti. Atex-tilan automaattiventtiilien ohjaukseen. Ohjataan reaktoreiden kaasun syöttöputken venttiileitä ja ulospuhallusventtiileitä. Perkolaation jakoventtiili ja raakakaasulinjan venttiilit toimivat pneumaattisesti. Yllä- pidetään paineita reaktoreiden pressujen kiinnitysletkuissa.
Puhaltimen nopeus m/s	Pitää olla suhteessa veden virtaamaan. Seurattavissa Unitronicsista

Taulukko 6. Jalostuksen seurattavat parametrit ja niiden yksiköt

8 Hajuhaittojen hallinta ja häiriötilanteisiin varautuminen Palopurolla

8.1 Hajuhaittojen hallinta

Hajuille ei ole määritelty normeja Suomen ympäristölainsäädännössä. Laitoksen lähistöllä oleva asutus sekä asukkaille mahdollisesti aiheutuva haitta on kuitenkin huomioitava ympäristövaikutusten arvioinnin yhteydessä sekä ympäristölupaa myönnettäessä. (Latvala 2009, 62.) Eräistä naapuruussuhteista annetun lain 17§: n 1 momentin mukaan on kiinteistön, rakennuksen tai huoneiston käytössä huomioitava, ettei siitä aiheudu kohtuutonta rasi- tusta ympäristölle haitallisista aineista, noesta, liasta, pölystä, hajusta, kosteudesta, melusta, tärinästä, säteilystä, valosta, lämmöstä tai muista vastaavista vaikutuksista naapurille, lähistöllä asuville tai kiinteistöä, rakennusta tai huoneistoa hallitsevalle.

Biokaasulaitoksella syntyvät hajut tulee kontrolloida niin, etteivät ne haittaa lähialueen asu- tusta tai yritystoimintaa. Ympäristöluvista on biokaasulaitosten kohdalla saatettu antaa määräys hajujen selvittämisestä ja käsittelystä naapuruussuhdelain perusteella. Hajukaa- supitoisuuksien raja-arvojen määrittäminen on hankalaa, sillä biokaasulaitosten hajupääs- töistä ja puhdistusjärjestelmien tehokkuuksista on vain vähän tietoa. Korkealla poistoilma- piipulla on mahdollista vähentää hajujen vaikutusta puhdistusjärjestelmien lisäksi. (Latvala 2009, 75, 62.)

Biokaasulaitoksella käsitelty orgaaninen aines on lähes aina hajuttomampaa kuin käsittele- mätön aines. Häiriötilanteissa saattaa syntyä hajukaasupäästöjä, kasvihuonepäästöjä tai terveydelle haitallisia päästöjä, näin ollen prosessihäiriöihin varautuminen on suunniteltava hyvin tarkkaan. (Latvala 2009, 59.) Syötteen vaihdon aikana (reaktorin täyttö tai tyhjennys) ja mädätteen levityksen aikaan saattaa esiintyä luonnollisesti jonkin verran hajuja.

Erilaisia menetelmiä hajukaasujen käsittelyyn ovat esimerkiksi biologinen hajunpoisto, ke- miallinen, hapettaminen, aktiivihiihi-suodatus, otsonointi sekä hajukaasujen poltto joko termi- sestä tai katalyyttisesti. Menetelmän valintaan vaikuttaa hajukaasujen koostumus, hajua ai- heuttavien yhdisteiden kemialliset ja fysikaaliset ominaisuudet. (Latvala 2009, 75.)

Tuuliolosuhteet vaikuttavat merkittävästi hajuyhdisteiden leviämiseen. Kaasumaisen koos- tumuksensa vuoksi hajuyhdisteet leviävät ilmavirtausten ja turbulenssin mukana. Hajuyh- disteiden leviämiseen vaikuttavat muun muassa tuulet, ilmanpaine, maaston esteet sekä hajukaasuun ja hajulähteeseen liittyvät muuttujat. (Sipilä ym. 1997, Makkosen 2008, 5–6 mukaan.)

Paikalliset sääolosuhteet ovat siis merkittävä tekijä hajuyhdisteiden leviämisessä. Stabi- leissa ilmakehän olosuhteissa tehdään eniten hajuhavaintoja, tuulen nopeuden ollessa noin

1–1,5 m/s. Stabiilit olosuhteet vallitsevat useimmiten aamuisin ja iltaisin. Metsäisissä maastoissa hajuja havaitaan vähemmän kuin avoimessa maastossa. (Makkonen 2008, 5–6.)

Hajukaasujen haihtuminen ilmaan lisääntyy lämpötilan noustessa, toisaalta myös hajuaistin herkkyys alenee lämpötilan nousun myötä. Ilman suhteellisen kosteuden lisääntyessä havaitun hajun voimakkuus laimenee. (Sipilä ym. 1997, Makkosen 2008, 6 mukaan.) Talvella hajut koetaan useimmiten vähemmän häiritseviksi kuin kesällä. Hajujen havaitseminen lisääntyy kesäisin, kun ulkona vietetään enemmän aikaa ja esimerkiksi ikkunoita pidetään auki. Hajun havaitseminen on vaikeampaa kylmässä ilmassa. (Arnold 2002, 19.)

Rikkivedyn aiheuttamia haittoja ovat sen inhiboiva vaikutus prosessille, korrodoivat vaikutukset sekä hajuhaitat. Rikkivedyn aiheuttamiin hajuhaittoihin voidaan vaikuttaa monella eri keinolla. Reaktoriin lisätään pieni määrä ilmaa, joka muuttaa rikkivedyn alkuainerikiksi. Rikkivedyn määrä on suurimmillaan panoksen vaihdon jälkeen, pitoisuudet alkavat tämän jälkeen pikkuhiljaa laskea. Jalostuksessa tapahtuva vesipesu vähentää rikkivedyn määrää prosessissa. Aktiivihiihli-suodatus toimii tämän jälkeen jäljellä olevien rikkivety-pitoisuuksien poistajana. Aktiivihiihli-suodatuksen tehokkuuteen vaikuttaa hiilien kapasiteetti poistettavan aineen suhteen, kontaktiaika sekä muiden orgaanisten aineiden osallistuminen prosessiin (Karttunen 2004, Aatola 2007,40 mukaan).

Rikkivety-pitoisuuksia tarkkaillaan Palopurolla raakabiokaasun osalta. Rikkivedyn poistamiseksi prosessista pidetään panosreaktorit alipaineessa, jolloin reaktoreihin tiheää pieniä määriä happea, joka syrjäyttää rikkivetyä. Jalostuksessa biokaasusta poistuva rikkivety suodatetaan aktiivihiihlien läpi.

Mädätysjäännöksen ja rejektivesien käsittely voivat aiheuttaa hajuhaittoja, mikä pitää ottaa huomioon näitä käsiteltäessä. Pelloille levitys tapahtuu vain lain sallimina aikoina, eli ei 15.10.–15.4. välisenä aikana. Pelloille levityksestä on hyvä informoida mahdollisuuksien mukaan lähialueen asukkaita.

8.2 Häiriötilanteisiin valmistautuminen

Palopuron biokaasulaitoksen henkilökunta on saanut käyttö- ja huoltokoulutuksen prosessi- ja laitetoimittajalta. Häiriötilanteisiin varaudutaan riittävillä huoltotoimenpiteillä sekä kahdesti viikossa tapahtuvilla laitoskierroksilla, jolloin käyttöhenkilöstö varmistaa laitteiden ja prosessien tilan, nämä kirjataan AHJO-kunnossapitojärjestelmään. Lisäksi viikoittaisella henkilöstön palaverilla huolehditaan siitä, että mahdolliset poikkeamat ja tarvittavat huollot tulevat laitoksen kanssa tekemissä olevan henkilöstön tietoon. Automaatio on ohjattu antamaan hälytykset prosessissa tapahtuviin poikkeamiin. Hälytyksiin reagoidaan käyttöhenkilöstön toimesta arkityöaikana, ja päivystävä henkilökunta vastaa hälytyksistä näiden aikojen

ulkopuolella. Häiriötilanteiden aiheuttamat ympäristöpäästöt on pyritty minimoimaan näillä toimilla.

Laitoksen suunnittelussa on huomioitu mahdolliset häiriötilanteet. Mikäli jalostuksessa ilmeneisi häiriöitä, voidaan raakabiokaasu ohjata kaasuväaraan. Kaasun siirtyminen reaktoreista voi häiriötilanteissa estyä, tällöin biokaasu purkautuu reaktorin täytyttyä varoventtiilin kautta. Tällaiset tilanteet on raportoitava ympäristöviranomaisille. Mikäli laitoksen sisätiloissa tapahtuisi vuoto-tilanne, voisi tällöin sinne vapautua metaania (CH₄) ja hiilidioksidia (CO₂), pieniä pitoisuuksia rikkivetyä (H₂S) sekä ammoniakkia (NH₃). Nämä voisivat aiheuttaa terveysriskin laitoksella olevalle henkilökunnalle sekä muille henkilöille laitoksen alueella, lisäksi nämä aiheuttaisivat tulipalon ja räjähdysvaaran. Laitosalueen ulkopuolisille henkilöille tällainen tilanne ei olisi vaaraksi, sillä purkautuessaan ulkoilmaan kaasu laimee nopeasti (Latvala 2009, 68). Laitoksella on automaattiset kaasun mittaus- ja hälytysjärjestelmät. Laitosalueella asioivilla on käytössään kannettavat henkilökohtaiset kaasumittarit. Laitosalueella asioiville, kuten hevosenlannantoimittajille, on toimitettu ohjeet laitosalueella toimimiseen. Ohje on tarkoitettu kuljetuksesta vastaaville henkilöille.

Henkilökunnan, joka vastaa biokaasulaitoksen käytöstä ja kunnossapidosta, on oltava tarkoitukseen nimetty ja siihen koulutettu. Biokaasulaitoksella on oltava kirjallinen huolto- ja kunnossapito-ohjelma. Laitoksella on lisäksi oltava täydelliset, ajantasaiset käyttö- ja huolto-ohjeet eri toimintoja varten. Laitevalmistajien ohjeiden mukaan tehdään ennakkohuoltosuunnittelu. (Kaasuyhdistys, 34.)

Huolto ja -kunnossapito-ohjelmassa on määriteltävä:

- Huolto-, tarkastus- ja kunnossapitotoimet
- Em. toimien suorittajat
- Em. toimien suoritusajankohdat (määrävälit) eri laitteille ja komponenteille

Toiminnanharjoittaja on vastuussa laitoksen turvallisuudesta, käytöstä ja määräaikaistarkastusten teettämisestä. Henkilökunta tulee olla koulutettu laitoksen käyttöön sekä perehdytetty laitoksen käyttö-, huolto- ja turvallisuusohjeisiin. Etävalvonta tulee olla myös ohjeistettua. (Kaasuyhdistys, 34.)

Vastuuhenkilöt on nimettävä tiettyihin tehtäviin, joita ovat: maakaasun käytön valvoja, painelaitteiden käytön valvoja, kemikaalien käytön valvoja sekä sähkölaitteiston käytön johtaja (Kaasuyhdistys, 35).

Paikalle asennetaan yleinen prosessikaavio turvallisuuteen liittyvien päälaitteiden ja venttiilien sijoituksesta. Putkistot ja virtaamat tulee merkitä selkeästi. Biokaasuputkien merkintänä

on käytettävä keltaista tunnusteippiä, jossa teksti ja virtaussuunnan osoittava nuoli ovat mustalla. Myös venttiilien tunnuskilvenvärit ovat keltainen ja musta. Hätätilanteiden toimintaohje on oltava näkyvällä paikalla, tämän lisäksi on oltava myös ohjeistus biokaasulaitoksella käytettävistä suojavarusteista. (Kaasuyhdistys, 26.)

9 Johtopäätökset

Biokaasulaitoksen prosessinhallinnan kannalta on monia huomioitavia asioita, jotta varmistetaan turvallinen ja vakaa tuotanto. Prosessin tuntemus ja syy-seuraussuhteiden tunteminen laitoksen parissa työskentelevillä asiantuntijoilla on luonnollisesti ehdoton asia. Panostoiminen kuivamädätys on Suomessa vielä verrattain vähän käytetty tapa tuottaa biokaasua, Keski-Euroopassa tämä on enemmän käytössä. Sen lisäksi, että Metener Oy on Palopuron Biokaasun laitostoimittaja, ovat he rakentaneet Suomeen ensimmäisen täysimittaisen panostoimisen kuivamädätyslaitoksen, joten tiivis yhteistyö heidän asiantuntijoidensa kanssa laitoksen toimintaperiaatteiden ymmärtämiseksi on äärimmäisen tärkeää.

Laitoksen turvallisen ja tasaisen tuotannon lisäksi on mahdollista vaikuttaa myös käyttökustannuksiin laitoksella. Henkilöstökulut on mahdollista pitää kurissa, kun laitoksen parissa työskentelevillä asiantuntijoilla ja käyttöhenkilöstöllä on riittävä asiantuntijuus prosessista. Myös laitteiston kunnon tarkkailu ja ennakoivat toimet laitteiston kunnossapidon osalta on mahdollista, kun laitoksen parissa työskentelevä henkilökunta tuntee riittävällä tasolla prosessin ja laitteiston toiminnan.

Oikein valitut materiaalit ja laitteet prosessissa ovat tärkeänä tekijä laitoksen turvallisen ja keskeytyksettömän toiminnan kannalta. Tähän liittyen laitteiston huollot on oltava valmistajien ohjeiden mukaan ajoitettuna sekä ajallaan tehtynä. Huolloista on oltava kirjalliset dokumentoinnit. Palopuron Biokaasun huollot on kirjattu ja ajoitettu Ahjo-kunnossapitojärjestelmään.

Prosessinhallinta edellyttää asiantuntijuuden ja laitteiston kunnossapidon lisäksi selkeää tehtävänjakoa ja tiedonkulkua. Kun laitoksen prosessin parissa työskentelee monia asiantuntijoita, jotka työskentelevät yrityksessä eri tehtävissä, eri toimipisteissä ja vaikkapa etänä, on tärkeää, että työnjako on erityisen hyvin ja selkeästi sovittu. Tiedonkulku on varmistettava ja kirjallinen dokumentointi erimerkiksi prosessimuutoksista ja laitokseen liittyvistä palavereista on tehtävä johdonmukaisesti. Henkilöstön vaihtuvuuteen on hyvä myös aina varautua, jolloin kirjallinen dokumentointi ja tiedonsiirto ovat avainasemassa.

Opinnäytetyössä tuotetulla parametriselvityksellä sekä teoretiedon keräämisellä voidaan lisätä biokaasulaitoksen parissa työskentelevien asiantuntijuutta prosessista.

10 Yhteenveto

Opinnäytetyön tarkoituksena oli kuvata Hyvinkäällä toimivan Palopuron Biokaasu Oy:n biokaasulaitoksen prosessin kannalta keskeiset parametrit sekä tuoda esiin prosessin hallintaan liittyviä seikkoja laitoksen parissa työskenteleville asiantuntijoille. Suomessa panostoiset kuivamädätyslaitokset ovat vielä melko harvinaisia ja Palopuron Biokaasun päivittäis-toiminnasta vastaavan käyttöhenkilökunnan työn tueksi kaivattiin biokaasulaitoksen prosessikuvausta sekä laitoksen toiminnan kannalta keskeisten parametrien kokoamista.

Biokaasun tuotannon ja tankkausaseman liiketoiminnan kannattavuuden kannalta kaasun tuotannon ennakoitavuus ja vakaus ovat olennaisia tekijöitä. Biokaasulaitoksen prosessin sujuvuus ja mahdollisimman häiriötön toiminta ovat siis tärkeässä roolissa.

Opinnäytetyössä on kuvattu biokaasun tuotantoon liittyviä keskeisiä teoreettisia näkökulmia ja erityisesti työssä on keskitytty panostoisimen kuivamädätysprosessin sekä biokaasun jalostuksen kannalta tärkeisiin tekijöihin. Biokaasun tuotannosta löytyy runsaasti teoretietoa ja opinnäytetyön laajuuden vuoksi oli jokseenkin haastavaa tehdä rajausta, mitä teoretietoa opinnäytetyöhön sisällytetään.

Tulevaisuudessa on hyvä keskittyä tietojen johdonmukaiseen dokumentointiin ja esimerkiksi laitoksen komponentit olisi hyvä saada kerättyä kunnossapitojärjestelmän tietoihin. Asiantuntijoiden hiljainen tieto on saatava kirjattua mahdollisuuksien mukaan kirjalliseen ja mahdollisimman helposti luettavaan muotoon. Erilaiset häiriö- ja vikatilanteet olisi arvokasta kirjata kootusti yhteen paikkaan, jotta tulevaisuudessa esiintyvien vastaavien tilanteiden selvittäminen helpottuu.

Vaikka olen jossain määrin työskennellyt Palopuron biokaasulaitoksen parissa, oli teoriaan perehtyminen sekä tietojen kokoaminen arvokas oppimiskokemus. Kiitän asiantuntijaavusta Metener Oy:n Juha Luostarista, Nivos Palvelut Oy:n Joonas Mäntystä, Timo Rautamaa sekä opinnäytetyöni työpaikkaohjaajaa Iida Hyytistä, jolta sain arvokasta tietoa prosessien kuvaamisesta sekä dokumentoinnin tärkeydestä prosessin ohjauksessa.

Lähteet

Aatola, L. 2007. Viemärihajujen synty ja hallintamenetelmät. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Viitattu 3.3.2021. Saatavissa <https://docplayer.fi/7909804-Laura-aatola-viemarihajujen-synty-ja-hallintamenetelmat-diplomityo.html>

Arnold, M. 2002. Eläinsuojien hajuhaitat – ohjeistumallit, arviointi ja vähentäminen sekä käytäntö eri maissa. Länsi-Suomen Ympäristökeskus. Alueelliset ympäristöjulkaisut 264. Viitattu 20.2.2021. Saatavissa <https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/120197/AY264.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

Bruijstens, A., Beuman, W., Molen, M., Rijke, J.d., Cloudt, R., Kadijk, G., Camp, O. & Bleuanus, S. 2008. Biogas composition and engine performance, including database and biogas property model. Stockholm: Biogasmix. Viitattu 4.1.2021. Saatavissa <http://publications.tno.nl/publication/26006495/fPcYpZ/bruijstens-2009-biogasmix.pdf>

Chen, Y., Vinh-Thang, H., Ramirez, A.A., Rodrigue, D. & Kaliaguine, S. 2015. Membrane gas separation technologies for biogas upgrading. RSC Advances. Royal Society of Chemistry. Viitattu 19.3.2021. Saatavissa https://www.researchgate.net/publication/272423302_Membrane_gas_separation_technologies_for_biogas_upgrading

Cozma, P., Wukovits, W., Mämälīgä, I., Friedl, A. & Gavrilescu, M. 2014. Modeling and simulation of high-pressure water scrubbing technology applied for biogas upgrading. Clean Techn Environ Policy 17, 373–391 (2015). Viitattu 13.1.2021. Saatavissa <https://link.springer.com/article/10.1007/s10098-014-0787-7#citeas>

Cvetkovski, I. & Litonjua, R. (2012) Biogas: Production, Consumption, and Applications. Hauppauge, N.Y.: Nova Science Publishers, Inc (Energy Science, Engineering and Technology). Viitattu 13.1.2021. Saatavissa <http://search.ebscohost.com.ezproxy.saimia.fi/login.aspx?direct=true&db=e000xww&AN=541468&site=ehost-live>.

Energiavirasto. Kestävyys ja liikennepolttoaineiden päästöjen vähentäminen. Viitattu 26.3.2021. Saatavissa <https://energiavirasto.fi/biomassojen-ja-biopoltttoaineiden-kestavyys>.

Kaasuyhdistys. Biokaasun turvallisuusohje. Viitattu 25.2.2021. Saatavissa <https://www.kaasuyhdistys.fi/julkaisut/biokaasun-turvallisuusohje/>

Kauppa- ja teollisuusministeriön päätös maakaasusetuksen soveltamisesta 1059/1993.

Kestävyyslaki 393/2013.

Khalid, A., Arshad, M., Anjum, M., Mahmood, T. & Dawson, L. (2011). The anaerobic digestion of solid organic waste. *Waste management*, 31(8), 1737–1744. Viitattu 19.3.2021. Saatavissa <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X11001668>

Kinnunen, V. & Rintala, J. 2015. Biokaasualan monet mahdollisuudet. Teoksessa Kymäläinen, M. & Pakarinen, O. (toim.) *Biokaasuteknologia. Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen*. Hämeenlinna: Hämeen ammattikorkeakoulu, 9–20. Viitattu 28.12.2020. Saatavissa https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/104180/HAMK_Biokaasun_tuotanto_2015_ekirja.pdf

Kymäläinen, M. & Luostarinen, S. 2015. Biokaasutuotannon raaka-aineet. Teoksessa Kymäläinen, M. & Pakarinen, O. (toim.) *Biokaasuteknologia. Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen*. Hämeenlinna: Hämeen ammattikorkeakoulu, 21–47. Viitattu 28.12.2020. Saatavissa https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/104180/HAMK_Biokaasun_tuotanto_2015_ekirja.pdf

Laki eräistä naapuruussuhteista 26/1920

Latvala, M. 2009. Biokaasun tuotanto suomalaisessa toimintaympäristössä. Suomen ympäristökeskus. Viitattu 17.9.2020. Saatavissa https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/37998/SY_24_2009.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Luostarinen, J. 2021. Pääsuunnittelija. Metener Oy. Haastattelu 3.3.2021.

Luostarinen, S. 2015. Biokaasuprosessit ja laitostaseet. Teoksessa Kymäläinen, M. & Pakarinen, O. (toim.) *Biokaasuteknologia. Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen*. Hämeenlinna: Hämeen ammattikorkeakoulu, 82–93. Viitattu 14.1.2021. Saatavissa https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/104180/HAMK_Biokaasun_tuotanto_2015_ekirja.pdf

Makkonen, T. 2008. Biovakka Oy:n biokaasulaitoksen hajujen leviämiselvitys hajupaneelin avulla. Turun yliopiston merenkulkualan koulutus- ja tutkimuskeskuksen julkaisuja. B 156. Viitattu 20.2.2021. Saatavissa <https://mkkdok.utu.fi/pub/B156-biovakka.pdf>

Marttinen, S., Luostarinen, S., Winquist, E. & Timonen, K. 2015. Rural biogas: feasibility and role in Finnish energy system. Viitattu 14.1.2021. Saatavissa <http://bestfinalreport.fi/files/Rural%20biogas%20-%20feasibility%20and%20role%20in%20the%20Finnish%20energy%20system.pdf>

Metener Oy. 2016. Loppuraportti. Viitattu 10.3.2021. Saatavissa <https://www.ym.fi/download/noname/%7BFEC7EB79-82EC-4741-9666-0AFB2FCC093C%7D/117250>

Metener Oy. 2018. Laitosratkaisut ja investoinnit. Viitattu 22.2.2021. Saatavissa https://www.jamk.fi/globalassets/tutkimus-ja-kehitys--research-and-development/tki-projektien-lohkot-ja-tiedostot/bika/viitasaari/metener_ratkaisut_viitasaari_270318.pdf

Monroe Environmental. Air Strippers. Viitattu 5.3.2021. Saatavissa <https://www.monroenvironmental.com/water-and-wastewater-treatment/air-strippers/>

Motiva. 2013. Biokaasun tuotanto maatilalla. Viitattu 18.9.2020. Saatavissa https://www.motiva.fi/files/6958/Biokaasun_tuotanto_maatilalla.pdf

Mäntynen, J. 2021. Kaukolämpöinsinööri. Nivos Palvelut Oy. Haastattelut 22.2.& 23.2.2021.

Nasir, I. M., Ghazi, T. I. M. & Omar, R. (2012). Production of biogas from solid organic wastes through anaerobic digestion: a review. Applied microbiology and biotechnology, 95(2), 321–329. Viitattu 19.3.2021. Saatavissa https://www.researchgate.net/publication/225058849_Production_of_biogas_from_solid_organic_wastes_through_anaerobic_digestion_A_review

Nivos. Biokaasun tankkausasema Palopurossa, Hyvinkäällä. Viitattu 18.9.2020. Saatavissa <https://www.nivos.fi/biokaasu/palopuron-biokaasu/palopuron-biokaasu>

Nivos Energia Oy. Palopuron Biokaasulaitos Oy:n biokaasulaitos. Viitattu 10.3.2021 Saatavissa <https://blogs.helsinki.fi/palopuronsymbioosi/files/2020/04/AES-verkostot-tietoiskunro-5-Kuivam%C3%A4d%C3%A4tyslaitos-hy%C3%B6dynt%C3%A4maatilallalannat-ja-peltobiomassat.pdf>

Ong, M. D, Williams, R. B. & Kaffka, S. R. 2014. DRAFT Comparative Assessment of Technology Options for Biogas Clean-up. Raportti. California Biomass Collaborative University of California. Viitattu 5.3.2021. Saatavissa https://biomass.ucdavis.edu/files/2015/10/Biogas-Cleanup-Report_FinalDraftv3_12Nov2014-2.pdf

Oram, B. Sulfur gas, hydrogen sulfide, rotten egg odours- clean drinking water systems. Water research center. Viitattu 8.1.2021. Saatavissa <https://water-research.net/index.php/sulfur>

OVA-ohje: Rikkivety. 2015. Verkkoaineisto. Työterveyslaitos. Viitattu 8.1.2021. Saatavissa <https://www.ttl.fi/ova/rikkivet.pdf>

Paavola, T & Kapuinen, P.2015. Mädätysjäännöksen käsittely ja hyödyntäminen. Teoksessa Kymäläinen, M. & Pakarinen, O. (toim.) Biokaasuteknologia. Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen. Hämeenlinna: Hämeen ammattikorkeakoulu, 94–

123. Viitattu 28.12.2020. Saatavissa https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/104180/HAMK_Biokaasun_tuotanto_2015_ekirja.pdf

Petersson, A. 2013. Biogas cleaning. Wellinger, A., Murphy, J., Baxter, D. & Braun, R. (toim.). The Biogas Handbook: Science, Production and Applications. Vol 52. Cambridge: Elsevier Science & Technology. 329–341. Viitattu 19.3.2021. Saatavissa <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780857094988500142>

Rautama, T. 2021. Lämpöhuoltomestari. Nivos Palvelut Oy. Haastattelu 23.2.2021.

Ravinnerinki. Typpi ja typpilannoitemäärät. Savonian julkaisu. Viitattu 10.2.2021. Saatavissa https://ravinnerenki.savonia.fi/images/Typpi_ja_typpilannoitem%C3%A4%C3%A4r%C3%A4t.pdf

Suomen Biokierto ja Biokaasu ry. Biokaasun käyttö. Viitattu 17.3. Saatavissa <https://biokierto.fi/biokaasu/kaytto/>

Tukes. Maakaasu ja biokaasu. Viitattu 25.2.2021. Saatavissa <https://tukes.fi/teollisuus/maakaasu-ja-biokaasu>

Valtioneuvoston asetus maakaasun käsittelyn turvallisuudesta 551/2009.

Valtioneuvoston asetus maataloudesta peräisin olevien nitraattien vesiin pääsyn rajoittamisesta 931/2000.

Virta, A. 2011. Biokaasutuotannon prosessit ja biokaasun tuotanto. Turun ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö. Viitattu 25.1.2021. Saatavissa https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/34331/Virta_Aleksi.pdf?sequence=1