

Tuomas Närhi

**PAINEENVAIHTELUADSORPTION
KÄYTTÖ BIOKAASULAITOKSESSA
OSANA BIOMETAANIN TUOTANTOPRO-
SESSIA**

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Kandidaatintyö
Toukokuu 2020

TIIVISTELMÄ

Tuomas Närhi: Paineenvaihteluadsorption käyttö biokaasulaitoksessa osana biometaanin tuotantoprosessia (Usage of Pressure Swing Adsorption as a Part of Biomethane Production)
Tampereen yliopisto
Ympäristö- ja energiatekniikan tutkinto-ohjelma
Kandidaatintyö
Toukokuu 2020

Biokaasulaitokset ovat hyvä esimerkki kiertotalouden käytännön toteutuksesta. Ne mahdollistavat energiantuotannon ja ravinteiden kierrätyksen usein jätteeksi mielletystä orgaanisesta materiaalista kuten kotitalouksien biojätteestä, vedenpuhdistamoiden lietteestä ja lannasta. Tässä kandidaatintyössä tutustutaan biokaasulaitoksen laitosprosessiin sekä lasketaan Mustankorkea Oy:n biokaasulaitoksen kaasun jalostuksen energiankulutus pohjana laitteiston nimellistehotiedot. Laskettua ja laitoksella mitattua energiankulutusta verrataan keskenään ja niiden perusteella lasketaan biokaasun jalostuksen energiakustannukset sekä tehdään yksinkertainen ympäristötarkastelu. Laitosprosessin kuvauksen painotus on kohdistettu biokaasun jalostukseen eli osaprosessiin, jonka tavoitteena on muokata lopputuotteen ominaisuudet jalostetun maakaasun ominaisuuksia vastaaviksi.

Biokaasun tuotantoprosessi koostuu raaka-aineen esikäsitteystä ja anaerobisesta mädätyksestä. Mädätysprosessissa syntyvä biometaani eli biokaasun metaani voidaan hyödyntää kaasuautojen polttoaineena, jos raakabiokaasun sisältämät muut komponentit kuten hiilidioksidi, vesi ja rikkivety poistetaan lopputuotteesta. Hiilidioksidi on määrällisesti selvästi suurin erotettavista komponenteista. Se voidaan poistaa biometaanista esimerkiksi paineenvaihteluadsorptiotekniikalla eli PSA-tekniikalla (englanniksi pressure swing adsorption). Tekniikka perustuu puhdistuskolonneissa tapahtuvaan hiilidioksidin adsorptioon. Tämä tarkoittaa hiilidioksidimolekyylin kiinnittymistä kolonnin adsorbenttien pintaan. Adsorbentteina käytetään esimerkiksi aktiivihiiltä tai zeoliitti-ryhmään kuuluvia mineraaleja. Adsorption ja sen vastinprosessin desorption nopeutta kontrolloidaan kolonnin paineen avulla.

Biokaasulaitoksen kaasun jalostuksen energiankulutus laskettiin työssä prosessin toimiessa osateholla. Energiankulutuksen perusteella voidaan määrittää suuri osa jalostuksen kustannuksista. Vertaamalla nimellistehoihin ja mittatietoon perustuvaa kustannuslaskentaa keskenään huomataan tehotietoihin perustuvien kustannusten olevan keskimäärin 2,5-kertaa todellisuutta suurempia. Laskennan tuloksia voisi tarkentaa erityisesti käyttämällä keskiarvotetun tuotannon sijasta todellisia biokaasuvirtoja ja tarkempia käyntiaikoja. Toisaalta tarkempien lähtöarvojen tarve heikentäisi laskennan soveltuvuutta nopeaksi ja kevyeksi suunnittelun aputyökaluksi. Voidaan pohdita, tulisiko tällainen aputyökalu perustua ennemmin mittausten perusteella luotaviin sovitteisiin.

Kustannuslaskennan lisäksi työssä toteutettiin yksinkertainen ympäristötarkastelu, jossa verrattiin liikenteessä käytettävän biometaanin ja sähköntuotantoon käytettävän jalostamattoman biokaasun hiilidioksidivaikutusta. Sekä nimellistehoihin perustuvan laskennan että mitatun tiedon perusteella biokaasun jalostus kaasuautojen polttoaineeksi todettiin olevan kasvihuonekaasupäästöjen perusteella kannattavampaa. Tuloksen perusteella Mustankorkea Oy:n tekemä biokaasun jalostus biometaaniksi on järkevää. Muun muassa tarkentamalla laskennassa käytettävää sähkön päästökerrointa jalostuksen vaikutuksen suuruus tarkentuisi merkittävästi. Tarkkaa tietoa biometaanin ympäristövaikutuksista voidaan hyödyntää esimerkiksi osana yrityksen markkinointia ja viestintää.

Avainsanat: PSA, paineenvaihteluadsorptio, biokaasun jalostus, biokaasulaitos

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkistettu Turnitin OriginalityCheck-ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. BIOKAASULAITOKSEN PROSESSI.....	3
2.1 Raaka-aineet.....	3
2.2 Esikäsittely	5
2.3 Anaerobinen mädätys	6
2.4 Kaasun puhdistus, jalostus ja paineistus.....	7
2.5 Biokaasulaitosten tulevaisuus	13
3. KAASUN JALOSTUKSEN ENERGIAKULUTUKSEN LASKENTA.....	15
4. PAINEENVAIHTELUADSORPTIOJALOSTUKSEN ANALYYSI	19
5. JOHTOPÄÄTÖKSET	22
LÄHTEET	23

1. JOHDANTO

Orgaanisesta aineksesta kuten erilliskerätystä kotitalousjätteestä, lannasta ja jätevedenpuhdistamon lietteestä voidaan biokaasulaitoksessa tuottaa biokaasua sekä multa- ja maanparannustuotteita. Tuotetun biokaasun jalostuksen jälkeen kaasu on lähes puhdasta metaania ja sitä voidaan hyödyntää kuten jalostettua maakaasua. Biokaasulaitokset ovat hyvä esimerkki kiertotalouden toteutuksesta käytännössä. Ne mahdollistavat sekä energian että ravinteiden kierron jätteeksi mielletystä orgaanisesta aineksesta.

Mädätysreaktiossa syntyvä biokaasu sisältää epäpuhtauksia, jotka voivat kaasun hyödyntämisen yhteydessä aiheuttaa terveysvaaraa ihmisille, lisätä päästöjä ja aiheuttaa laitteistolle korroosiota [1]. Yhdistetyssä sähkön ja lämmön tuotannossa riittää, että epäpuhtauksista vesi (H_2O) ja rikkivety (H_2S) poistetaan, mutta liikennepolttoainekäyttöön tarkoitetun biometaanin puhtausvaatimukset ovat merkittävästi tiukemmat [2]. Kun sähköntuotantoon käytetään pieniä turbiineja, myös siloksaanien poiston merkitys kasvaa. Käytännössä biokaasun jalostuksella biometaaniksi viitataan usein hiilidioksidin (CO_2) poistoon, koska se on määrällisesti suurin kaasuseoksesta erotettava komponentti [3].

Elinkaarianalyysitutkimukset osoittavat, että biokaasun jalostus liikennepolttoaineeksi tai kaasuverkkoon syötettäväksi on ympäristön kannalta tehokkain tapa hyödyntää biokaasua. Vuonna 2014 toteutettujen haastattelujen perusteella suomalaisissa yhdyskuntajätettä käsittelevissä biokaasulaitoksissa ulkoista energiantuotantoa ei kuitenkaan yleisesti ole priorisoitu. [4] Suomessa monipuolisia orgaanisia jätevirtoja hyödyntävät biokaasulaitokset saivat 80 % tuloistaan jätteenkäsittelyn porttimaksuista ja vain noin 0,5 % Suomen uusiutuvasta energiasta tuotettiin biokaasulla vuonna 2017 [5].

Toisaalta Suomessa on päätetty merkittäviä poliittisia tavoitteita biokaasun käytön kohdistamiseksi ja tuotannon lisäämiseksi, kuten 50 000 kaasuauton tavoite 2030 mennessä ja uusiutuvien liikennepolttoaineiden osuuden kasvatus 40 %:iin 2030 mennessä. Suomessa oli vuonna 2018 noin 5 600 kaasuautoa. [5] Tällä hetkellä biokaasu ei kuulu biopolttoaineiden jakeluvuorituksen piiriin, mutta työ- ja elinkeinoministeriö on selvittänyt Marinin hallitusohjelman mukaisesti sen lisäämistä jakeluvuoritteeseen [6]. Huomioitavaa on, että biokaasun tuotanto ei yksistään täytä uusiutuvan polttoaineen tavoitetta.

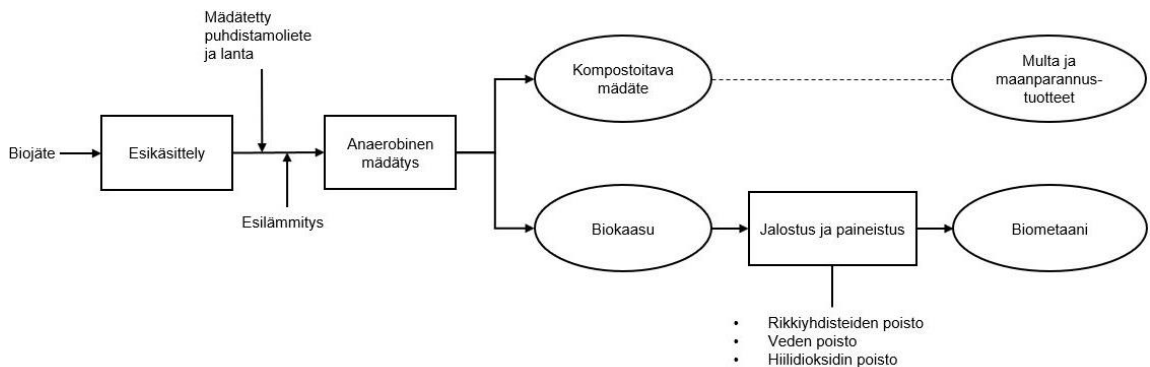
Biokaasun lisäyspotentiaali on kuitenkin merkittävä, koska vain 7 % biokaasuntuotantoon soveltuvasta ruoantuotannon kanssa kilpailemattomasta biomassasta hyödynnettiin vuonna 2017 Suomessa [5].

Kandidaatintyössä perehdytään biokaasulaitosprosessiin ja Mustankorkea Oy:n Jyväskylän biokaasulaitoksen kaasun jalostuksen ja paineistuksen energiankulutukseen. Mustankorkean jalostama biokaasu eli biometaani käytetään uusiutuvana liikennepolttoaineena kaasuautoissa. Biokaasulaitoksen kaasun jalostuksen ja paineistuksen energiatas tarkastelu perustuu laitteiston nimellistehotietoihin sekä laitoksella mitattuun energiankulutukseen. Energiakulutustietoja hyödynnetään yksinkertaiseen käyttökustannus- ja hiilidioksidivaikutuslaskentaan. Energian kulutuksen laskeminen on tärkeää, jotta voidaan arvioida kaasun jalostuksen merkitys koko biokaasulaitoksen energiataloudessa.

Luvussa 2 käsitellään jäteperäisen biokaasun tuotannon ja prosessoinnin yleiset vaiheet, joista erityisesti keskitytään kaasun puhdistukseen, jalostukseen ja paineistukseen. Jalostuksen kustannus- ja vaikutuslaskennassa käytetyt oletukset sekä yksinkertaistukset esitellään luvussa 3. Luvussa 4 esitetään tulokset ja niitä analysoidaan sekä pohditaan niiden hyödyntämismahdollisuuksia. Lopuksi luvussa 5 esitetään johtopäätökset työn tuloksista.

2. BIOKAASULAITOKSEN PROSESSI

Biokaasuksi kutsutaan pääasiassa metaania (CH_4) ja hiilidioksidia (CO_2) sisältävää energiakäyttöön tarkoitettua kaasuseosta, joka on tuotettu anaerobisella mädätyksellä [7, pp. 65–68]. Biokaasua tuottavien laitosten koko voi vaihdella maatilan yhteydessä toimivista reaktoreista teollisen mittakaavaan tuotantolaitoksiin. Kuvassa 1 on esitetty yksinkertainen prosessikuvaus monipuolista orgaanista jätettä käsittelevän biokaasulaitoksen tuotantoprosessista, jonka lopputuotteina ovat multa ja maanparannustuotteet sekä maakaasunkaltaisesti hyödynnettävä biometaani.

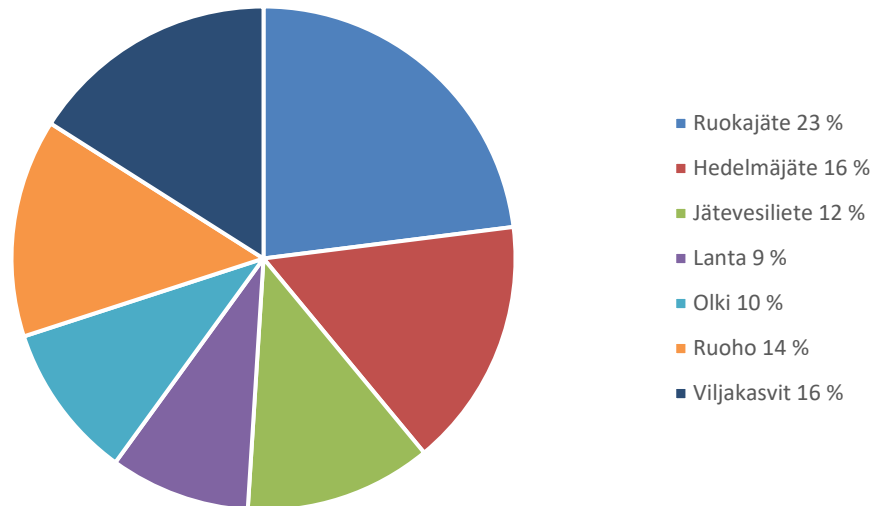


Kuva 1. Biometaanin tuotannon prosessikaavio biokaasulaitoksessa, jonka raaka-aineina käytetään biojätettä, puhdistamoliettä ja lantaa.

Prosessivaiheet esitellään tarkemmin 2.2 — 2.4 luvuissa. Käytetyt tekniikat vaihtelevat laitoksittain. Erityisesti biokaasulaitoksen käsittelemän raaka-aineen ominaisuudet vaikuttavat prosessilaitteiston valintaan.

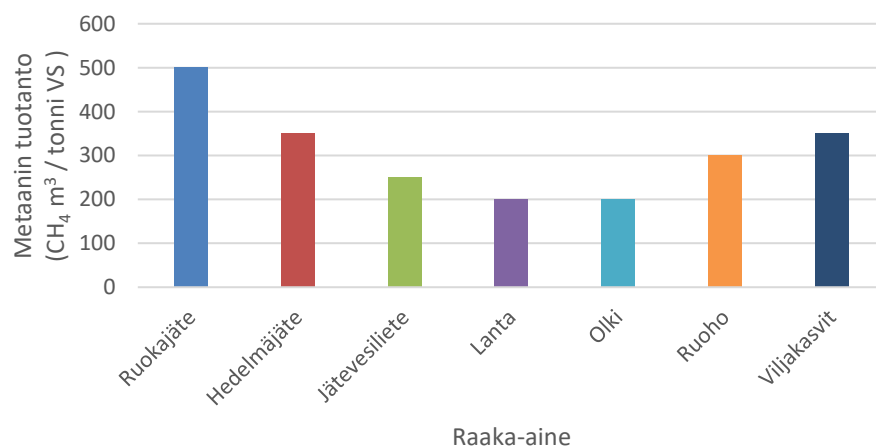
2.1 Raaka-aineet

Biokaasulaitosten prosessi perustuu laitoksen koosta riippumatta orgaanisen aineksen käsittelyyn mikrobiprosessien avulla. Kuvasta 2 nähdään erilaisten jäteraaka-aineiden muodostavan globaalisti yli puolet biokaasulaitoksissa käytetystä raaka-aineesta ruokajätteen ollessa merkittävin yksittäinen jae.



Kuva 2. Eri raaka-aineiden osuudet biokaasun tuotannossa maailmanlaajuisesti. Perustuu lähteeseen [8].

Jätteen suuri osuus raaka-aineesta on ymmärrettävää, koska orgaanisen jätteen käsittely on yhteiskunnille välttämätöntä. Jäteperäisestä raaka-aineesta ei yleensä tarvitse maksaa, vaan monesti sen käsittelystä maksetaan. Kuvasta 3 nähdään, että jäteraaka-aineista on myös mahdollista tuottaa paljon metaania verrattuna muihin yleisiin raaka-aineisiin. Raaka-aineiden tuottama metaani on suhteutettu VS-tonnia kohden (engl. volatile solid). VS-aines tarkoittaa raaka-aineen kiinteää orgaanista ainesta. VS-pitoisuus on hyvä työkalu syötteen biokaasutuotannon potentiaalın arvioinnissa, vaikka sen perusteella ei suoraan tiedetä, kuinka helposti hyödynnettävää orgaaninen aines mikrobeille on [9, p. 61,177,231].



Kuva 3. Tuotetun metaanin määrä raaka-aineen VS-tonnia kohden. Perustuu lähteeseen [8].

Ruokajätteen koostumus vaihtelee paljon, mikä vaikuttaa suoraan tuotetun biokaasun määrään sekä muodostuvan metaanin suhteeseen hiilidioksidin kanssa [10]. Monipuolinen raaka-ainesyöttö voi olla myös perusteltua, koska pelkän ruokajätteen käsittelyn on havaittu aiheuttavan mädätysprosessiin epästabiilisuutta [11].

Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskuksen vuonna 2012 julkaiseman raportin mukaan jäteperäisen biometaanin tuotanto on taloudellisesti kannattavaa myös Suomessa, ja siinä ennakoitiin biometaanin kysynnän kasvaessa myös maataloustuotteista tuotetun biometaanin tulevan taloudellisesti kannattavaksi [12]. Raportissa painotetaan jätteen määrän vähentämisen olevan korkeamman prioriteetin toimi kuin jätteen kierrätys tai energian talteenotto EU-direktiivin 2008/98/EC mukaisesti.

2.2 Esikäsittely

Biomassan nopeus hajota mädätyksen lopputuotteiksi eli metaaniksi ja hiilidioksidiksi riippuu pääasiassa biomassan hiilihydraattien sidosten voimakkuudesta. Erilaisten biomassan esikäsittelytekniikoiden tavoitteena on muuntaa hiiliyhdisteet mikrobeille sopivampaan muotoon, jolloin reaktioaika lyhenee ja biokaasun tuotanto kasvaa. Esikäsitteilyä voidaan toteuttaa fysikaalisesti, kemiallisesti ja biologisesti. Moni esikäsitteilytekniikka kuluttaa paljon energiaa ja niiden investointikustannukset ovat suuret, joten laitteistojen tarve tulee harkita laitospohjaisesti käytetyn syötteen mukaan. Erilliskerättyä yhdyskuntien biojätettä käsittelevät laitokset kuluttavat määrällisesti noin 20 % tuotetun biokaasun energiasta raaka-aineen esikäsitteilyyn. Tyypillisesti sähkön tarve esikäsitteilyssä on selvästi lämmöntarvetta suurempi. [9, pp. 89-99,214] Tavanomaiset esikäsitteilyvaiheet ovat raaka-aineiden murskaus, sekoitus ja lämpökäsittely [13, p. 12].

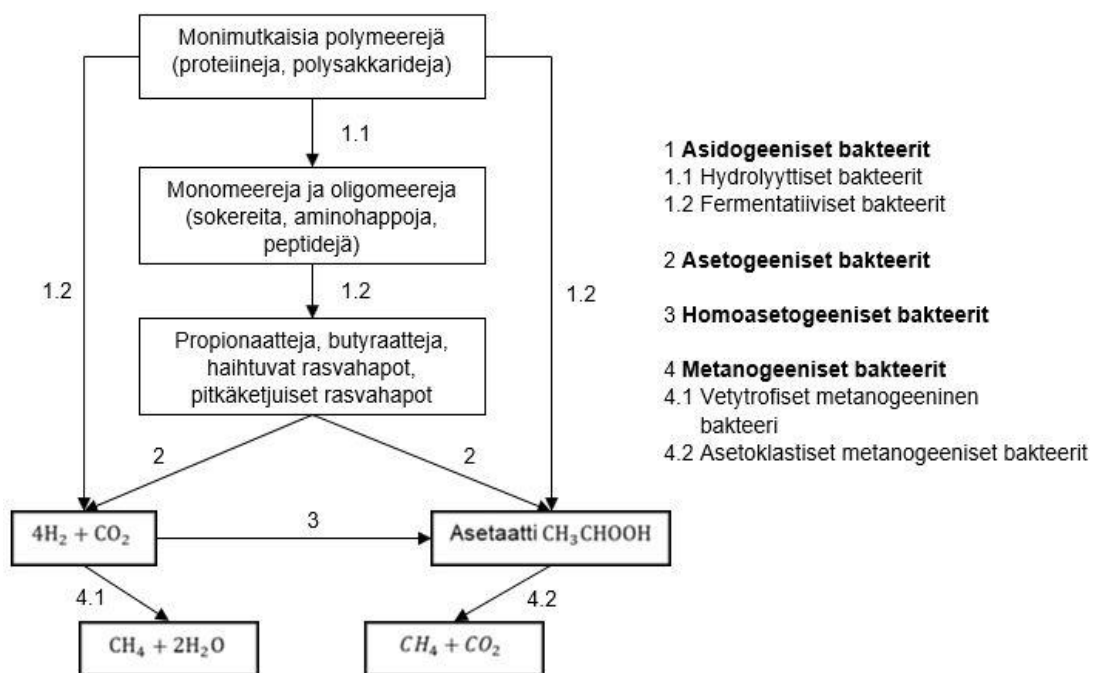
Mekaanisen esikäsitteilyn tavoitteena on lisätä biomassan ominaispinta-alaa, mikä nopeuttaa reaktioita. Partikkelikoon pienennys vähentää myös massan viskositeettia, mikä helpottaa massan kuljetusta ja mädätyksessä syntyvän biokaasun talteenottoa. Käytännössä mekaaninen esikäsitteily tarkoittaa murskausta tai paloittelua ja sitä tehdään esimerkiksi vasaramyllyllä. Myllyt kuluttavat paljon sähköä, eli ne ovat merkittävä muuttuva kustannus laitokselle. Lisäksi ne vaativat toimiakseen kohtalaisen kuivan biomassan, jossa ei ole kovia epäpuhtauksia, kuten kiviä. [9, pp. 90–91]

EU komission asetus 142/2011 määrää, että biokaasulaitoksessa käsiteltävät luokkaan 3 kuuluvat eläinperäiset sivutuotteet (muun muassa eläinten ruhot) tulee erikseen ilmoitettuja poikkeuksia lukuun ottamatta käsitellä tunnin ajan 70 °C:ssa lämpötilassa partikkelikoon ollessa maksimissaan 12 mm [14]. Lämpökäsittelyn tehtävänä on hygienisoida raaka-aine. Hygienisointi voidaan toteuttaa esimerkiksi laimentamalla murskattu

jäte vedellä ja lämmittämällä seosta pastörintisäiliössä. Energiatehokkuuden parantamiseksi seosta voidaan esilämmittää lämmönvaihtimilla, joissa hyödynnetään jo hygienisoidun raaka-aineen tai mädätysreaktorista poistuvan mädätteen lämpöä. [15]

2.3 Anaerobinen mädätys

Anaerobinen mädätys tapahtuu nimensä mukaisesti hapettomissa olosuhteissa. Prosessi koostuu kuvan 4 mukaisesti neljästä päävaiheesta: hydrolyysi, asidogeneesi, asetogeneesi ja metanogeneesi. Kunkin vaiheen mahdollistaa siihen erikoistunut mikrobikanta. [9, pp. 104–109]



Kuva 4. Anaerobinen mädätysprosessi. Perustuu lähteeseen [9]

Hydrolyyttiset entsyymit hydrolysoivat eli hajottavat polymeerit monomeereiksi. Prosessin suurin massavirta seuraa kuvan 4 keskilinjaa eli syntyneet monomeerit fermentoidaan edelleen muun muassa haihtuviksi rasvahapoiksi. Asetogeeniset bakteerit tuottavat hajotusprosessinsa yhteydessä vetyä, joka on niille myrkyllistä. Siksi homoasetogeenisten bakteerien ja metanogeenisten arkkien vetyä kuluttava vaikutus on kokonaisprosessin kannalta erittäin tärkeää. Noin 70 % tuotetusta metaanista syntyy kuvassa 4 esitetyn asetaattivaiheen kautta. [9, pp. 104–109]

Mikrobikannan tehokkaan toimimisen kannalta erityistä huomiota tulee kiinnittää reaktorin hapettomuuteen, tasaiseen ja suotuisaan lämpötilaan, ravintoaineksen sisäl-

töön ja sen optimoituun syöttöön sekä tasaiseen ja suotuisaan pH:hon [9, p. 3]. Biokaasureaktorit voidaan jakaa kolmeen pääryhmään reaktorissa vallitsevan lämpötilan mukaan: termofiilinen (50 — 65 °C), mesofiilinen (30 — 45 °C) ja normaalin lämpötilan fermentaatio (10 — 25 °C). Optimilämpötilavälit ovat tarkempia, kuin edellä annetut oppikirjamääritelmät. [13, p. 9]. Termofiilisen prosessin on arvioitu tuottavan metaania 25 — 50 % nopeammin kuin mesofiilinen prosessi. Toisaalta mädätysprosessi aiheuttaa yleensä suurimman lämpöenergian kulutuksen biokaasulaitoksessa, joten meso- ja termofiilisiä prosesseja ei voi vertailla pelkästään tuotantomäärien perusteella. [9, pp. 140, 214]

Ravintoaineksen syöttö lisää mikrobien ravinnon määrää, mutta syöttönopeuden ollessa liian suuri mikrobit eivät ehdi käsitellä kaikkea raaka-ainetta. Olennaista on myös varmistaa, ettei syöte ole liian yksipuolista, vaan se sisältää kaikkia tarvittavia raaka-aineita. Syöteen C/N-suhde on hyvä tarkastelun apuväline. Mikrobit kuluttavat hiiltä (C) energiatuotantonsa ja typpeä (N) uusien solujen rakennusaineena. Suhde ei saa olla liian korkea, koska silloin kaikkea hiiltä ei saada käsiteltyä ja prosessin hyötysuhde laskee. Liian matala C/N-suhde taas johtaa ammoniakkin muodostumiseen ylimääräydestä. Ammoniakki toimii mädätysreaktiossa inhibiittorina. [10]

Systeemin pH riippuu anaerobisessa mädätyksessä sekä syöteraaka-aineesta että biologisten reaktioiden tuotteiden tasapainosta. [13, p. 9] Asidogeeninen prosessi happamoittaa systeemiä, mutta metanogeeninen prosessi vaatii 6,5 — 7 pH:n, joten prosessin happamuutta tulee tarkkailla. Reaktoritekniikasta riippuen esimerkiksi biomasan sekoituksella voidaan auttaa reaktorin olosuhteiden, kuten lämpötilan ja ravinnepitoisuuksien, pysymistä tasaisena. [10]

2.4 Kaasun puhdistus, jalostus ja paineistus

Anaerobisen mädätyksen seurauksena syntyvä biokaasu voidaan esimerkiksi polttaa laitoksen CHP-yksikössä (engl. combined heat and power) sähköksi ja lämmöksi tai biokaasu voidaan jalostaa, jolloin se voidaan käyttää liikennepolttoaineena tai syöttää maakaasuverkkoon. Yleensä tuotettu sähkö hyödynnetään mahdollisuuksien mukaan laitosalueella ja tuotetulla lämmöllä lämmitetään muun muassa reaktoreita. Biokaasua poltetaan myös soihduissa, jos sille ei löydetä taloudellista käyttökohdetta ympäri vuoden. [4]

Biokaasun käsittely biometaaniksi tarkoittaa käytännössä sen puhdistamista eli biokaasun hyödyntämistä haittaavien epäpuhtauksien poistamista ja kaasun jalostusta eli hiilidioksidin poistamista tavoitellun Wobben indeksin saavuttamiseksi. Wobben indeksiin vaikuttaa kaasun lämpöarvo ja ominaistilavuus. [16] Biokaasun jalostuksen tavoitteena on käytännössä tuottaa kaasua, jota voi hyödyntää kuten jalostettua maakaasua.

Taulukossa 1 on vertailtu tyypillisen biokaasun ja Pohjanmeren alueelta kerätyn maakaasun koostumuksia. Biokaasun koostumukseen vaikuttavat monet tekijät kuten käytetty raaka-aine sekä mädätysreaktorin tekniikka ja maakaasun komponenttien suhteet vaihtelevat sen syntypaikan mukaan. Taulukon 1 arvoja voidaan käyttää kuitenkin kaasuseosten komponenttien ja tunnuslukujen suuruusluokkien vertailuun.

Taulukko 1. *Jalostamattoman biokaasun ja Pohjanmeren maakaasun tyypilliset koostumukset [17].*

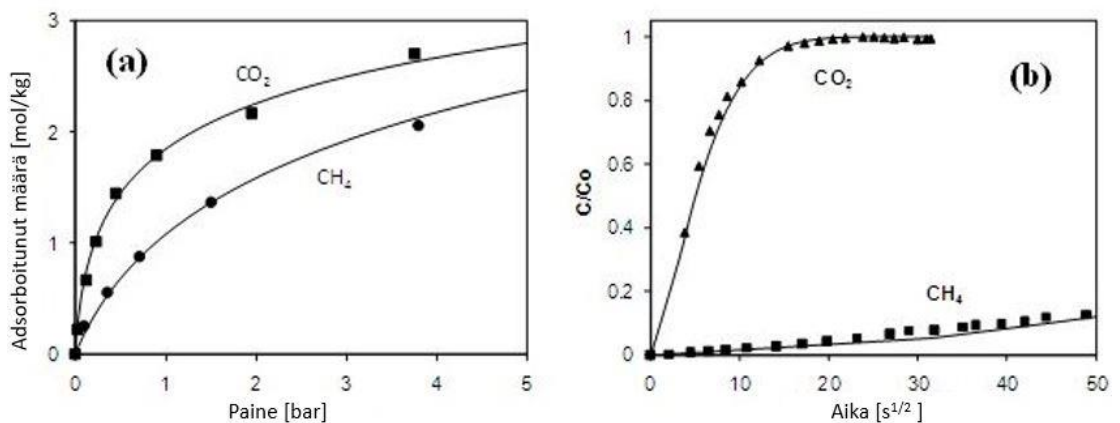
Parametri	Yksikkö	Biokaasu	Maakaasu Pohjanmereltä
Alempi lämpöarvo	MJ / N m ³	23	40
Wobben indeksi	MJ / N m ³	27	55
CH ₄	V-%	60 — 70	85 — 92
Raskaat hiilivedyt	V-%	0	9
CO ₂	V-%	30 — 40	0,2 — 1,5
H ₂ O	V-%	1 — 5	-
N ₂	V-%	0 — 0,5	0,3 — 1,0
H ₂ S	ppm	0 — 4000	1,1 — 5,9
NH ₃	ppm	100	0
Cl ⁻ (kokonaismäärä)	Mg / Mm ³	0 — 5	-

Taulukossa 1 esitetyn puhdistamattoman biokaasun lämpöarvon pienuuden selittää erityisesti biokaasun sisältämän hiilidioksidin suuri osuus. Vesi reagoi H₂S, NH₃, tai CO₂-molekyylien kanssa muodostaen happamia yhdisteitä, jotka aiheuttavat korroosiota prosessilaitteistossa sekä kaasua polttavissa moottoreissa. Lisäksi kaasuseoksen sisältämä vesi voi kondensoitua tai jäättyä paineistuksen yhteydessä rikkoen laitteiston. Rikkivety on myrkyllinen kaasu ja palamisreaktiossa se muuntuu rikkidioksidiksi (SO₂) tai rikkitrioksidiksi (SO₃), jotka ovat vielä rikkivetyä myrkyllisempiä yhdisteitä. Kaasuseoksessa oleva kloori aiheuttaa polttomoottoreissa korroosiota. [16] Taulukossa 1 esitettyjen komponenttien lisäksi biokaasu voi sisältää esimerkiksi siloksaaneja. Ne voivat muun muassa sähköntuotannon yhteydessä kuluttaa turbiinin lapoja tai kerääntyä niihin aiheuttaen laitevian. [1]

Luvussa 2.2 esitetyn mädätysprosessin vaiheiden perusteella (kuva 4) prosessissa syntyvässä biokaasussa on runsaasti hiilidioksidia. Tämä huomataan myös taulukosta 1. Hiilidioksidi on hiilivetyjen palamisreaktioiden lopputuote, joten se ei lisää kaasuseoksen lämpöarvoa. Lisäksi hiilidioksidin paineistus osana biokaasua kuluttaa energiaa ja vie korkeapaineista varastointitilaa, joten se tulee poistaa mahdollisimman tehokkaasti lopputuotteena toimivasta biometaanista. [10] Biokaasun jalostukseen voidaan käyttää useita eri tekniikoita kuten paineenvaihteluadsorptiota eli PSA-tekniikkaa (engl. pressure swing adsorption), fysikaalista tai kemiallista absorptiota ja membraanierotusta. Mikään

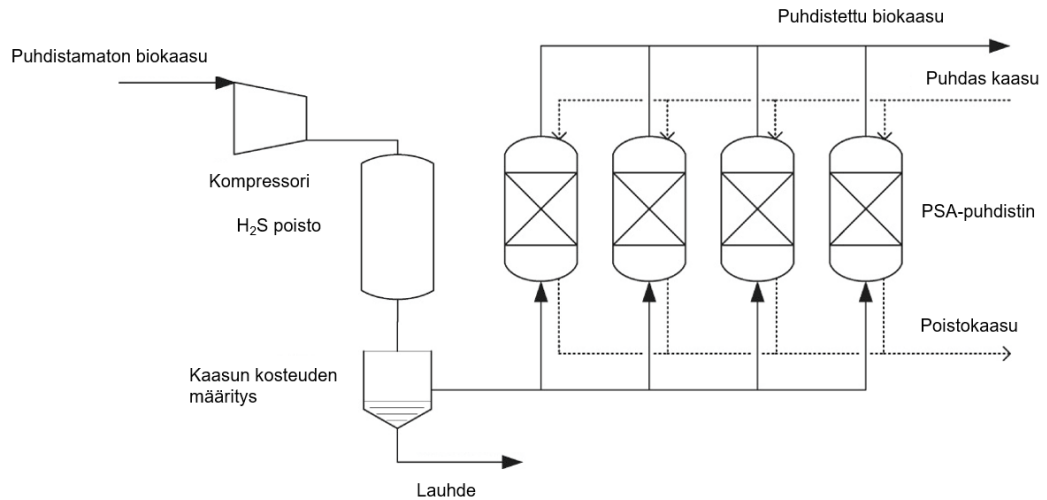
yksittäinen tekniikka ei ole noussut selvästi muita paremmaksi. [3], [17] Sopivimman jaostusmenetelmän valintaan vaikuttaa muun muassa kyseisen laitoksen muu konfiguraatio, lopputuotteen käyttötarkoitus ja vallitseva lainsäädäntö [1].

PSA-tekniikka perustuu hiilidioksidimolekyylien selektiiviseen adsorptioon huokoiseen adsorbenttiin [18]. Määritelmänsä mukaisesti adsorptio on prosessi, jossa kiinteään aineen pintaan kiinnittyy molekyylejä kaasu tai nestefaasista [19]. Adsorbenttina voidaan käyttää esimerkiksi aktiivihiiltä tai zeoliittejä. PSA-laitteistossa käytettävällä adsorbentilla tulee olla hyvä CO_2 -selektiivisyys tai hiilidioksidin tulee sitoutua adsorbenttiin nopeammin kuin metaanin. Hyvä selektiivisyys tarkoittaa käytännössä sitä, että pinnan ja hiilidioksidimolekyylin välinen sidos on voimakkaampi kuin sidos metaanimolekyylin kanssa. Molekyylien adsorptioon kinetiikkaan voidaan vaikuttaa sopivan pienellä materiaalin huokosten koolla, koska hiilidioksidimolekyylien koko on $3,4 \text{ \AA}$ ja metaanin $3,8 \text{ \AA}$. [18] Kuvassa 5 (a) on esitetty materiaalille CO_2 ja CH_4 -adsorptio tasapainokäyrät ja kuvassa 5 (b) verrattu reaktioiden nopeuksia.



Kuva 5. Hiilidioksidin ja metaanin adsorptio lämpötilassa 298 K esimerkkimateriaaliin: (a) adsorptio tasapainokäyrät; (b) adsorptio nopeus. Perustuu lähteeseen [18].

Adsorboidut molekyylit saadaan vapautettua adsorbentista laskemalla painetta, jolloin adsorptio ja sen vastinilmiön desorptio suhde muuttuu [20]. Paineen vaikutus adsorptioon nähdään myös kuvasta 5 (a). PSA-prosessi tapahtuu yleensä 4 — 10 bar paineessa ja prosessin painehäviöt ovat hyvin pienet [18]. Kuvassa 6 on esitetty yksinkertaistettu virtauskaavio PSA-yksiköstä.

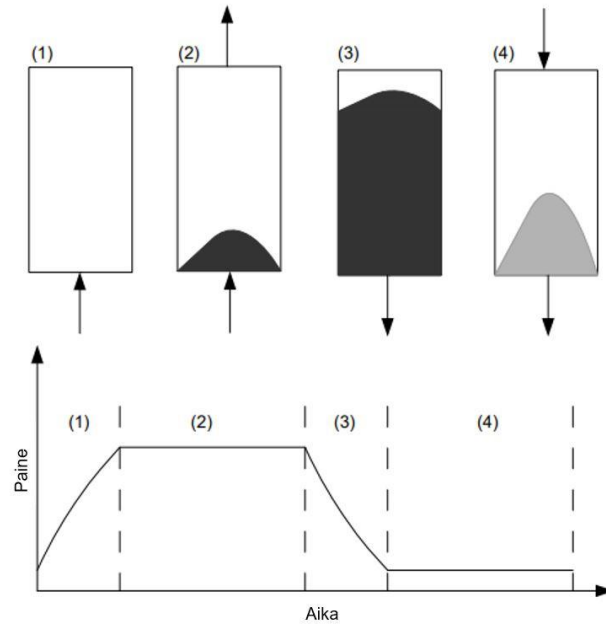


Kuva 6. Esimerkki virtauskaaviosta PSA-yksikölle sekä sen tarvitsemille esiprosesseille. Perustuu lähteeseen [21]

Mädätysreaktorista lähtevä biokaasu on veden suhteen kylläistä, joten veden haitallinen kondensoituminen prosessilaitteisiin tulee estää. Jalostusmenetelmissä, joissa biokaasua paineistetaan ennen jalostuslaitteistoa, veden poisto tapahtuu usein kompressorin jälkeen. Kaasun lämpötila nousee paineistuksen yhteydessä, joten vesi saadaan kondensoitumaan biokaasusta hallitusti viilentämällä kaasuseosta korkeapaineisena. [9, pp. 344–346] Kosteuden poisto voi tapahtua kuvasta 6 poiketen myös heti kompressorin jälkeen.

Kuvan 6 mukaisesti biokaasusta on tärkeä puhdistaa rikkivedyt ennen PSA-jalostusta, koska ne adsorboituvat peruuttamattomasti käytettyyn adsorbenttiin heikentäen sen puhdistustehoa. Rikkiyhdisteiden poisto biokaasun puhdistuksessa jaetaan primääriin ja tarkkaan rikinpoistoon. Primäärisessä vaiheessa tapahtuu määrällisesti suurin rikkiyhdisteiden erotus ja tarkalla rikinpoistolla säädetään rikkipitoisuus täsmällisemmin tavoitearvoon. Primäärisissä poistomenetelmissä hyödynnetään esimerkiksi biologista rikkivetyjen pelkistämistä tai rautayhdisteitä rikkiyhdisteiden saostukseen. Tarkka rikinpoisto voidaan tehdä muun muassa aktiivihieillä, jolloin erotusreaktio perustuu katalyyttiseen hapettumiseen ja sitä seuraavaan adsorptioon. [9, pp. 346–348]

PSA-kolonnissa tapahtuva hiilidioksidin poiston prosessisykli voi olla esimerkiksi niin sanottu Skarstrom sykli, mikä koostuu neljästä päävaiheesta: paineistus (1), syöttö (2), tyhjennys (3) ja puhdistus (4) [9]. Kuvassa 6 esitetään Skarstrom syklin vaiheiden ja kolonnissa valitsevan painetason yhteys.



Kuva 7. Periaatekuva Skarstrom sykliä noudattavan kolonnin prosessivaiheista ja niiden painetasosta PSA-yksikössä. Perustuu lähteeseen [3]

Skarstrom syklistä kolonni paineistetaan (1) aluksi joko puhdistettavalla tai puhdistetulla kaasulla. Syöttövaiheessa (2) puhdistettavan kaasuseoksen annetaan virrata kolonnin läpi, jolloin hiilidioksidi adsorboituu adsorbenttien pintaan metaanin jatkaessa virtaustaan. Kolonnin läpi kulkenut kaasu on biokaasun jalostuksen lopputuote. Kun kolonnin adsorbenttien adsorptiopaikat ovat täynnä, kolonni siirtyy tyhjennysvaiheeseen (3). Aluksi puhdistettavan kaasun syöttö katkaistaan, minkä jälkeen kolonnin painetta laskeetaan ja hiilidioksidia vapautuu desorption vaikutuksesta. Läpivirtauksen katkaisun yhteydessä kolonniin jäänyt, metaania sisältävä, puhdistamaton biokaasu ja petimateriaalista vapautuva hiilidioksidi voidaan aluksi johtaa toiseen kolonniin, joka on paineistusvaiheessa. Tällä tavalla metaanihäviöitä saadaan pienennettyä ja paineistukseen tarvittavaa energiankulutusta vähennettyä. Kun tyhjennettävä kolonni saavuttaa prosessisyklin matalimman paineen, se puhdistetaan (4) lopusta hiilidioksidista käyttämällä puhdistettua metaania. Kolonnin puhdistuksessa kaasuvirran suunta on vastakkainen verrattuna virtauksen suuntaan syöttövaiheessa. Puhdistuksen jälkeen kolonni on syklin alkupisteessä. [3]

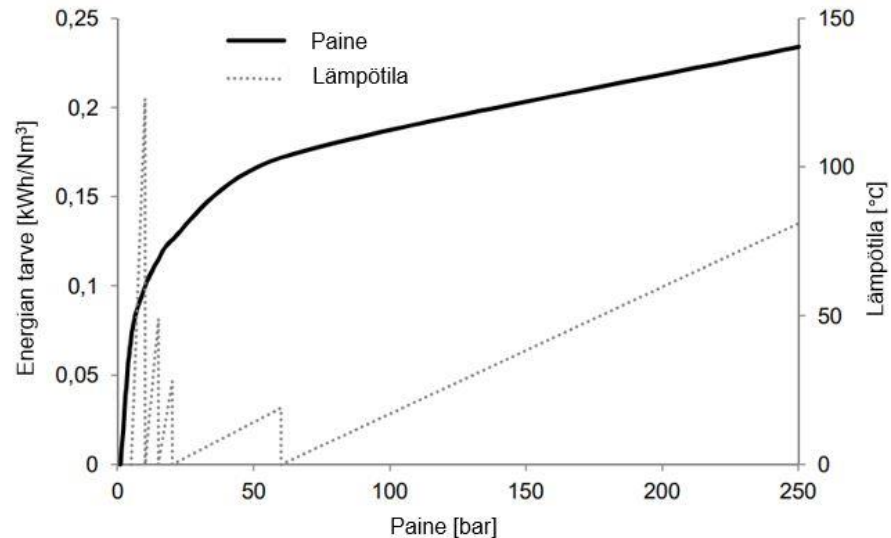
PSA-tekniikkaa hyödyntävässä kaasun jalostuksessa käytetään usein vähintään neljää kolonnia, jotta adsorptioprosessi on jatkuvasti käynnissä jossain yksikön kolonnissa. Lisäämällä kolonnien määrää monimutkaisempien ja energiatehokkaampien syklien toteuttaminen on mahdollista. Tällaisissa konfiguraatioissa investointikustannukset ovat luonnollisesti suurempia kuin yksinkertaisemmissa järjestelmissä. [3]

PSA-jalostuksella on mahdollista poistaa 98 —99 % biokaasun hiilidioksidista. Kolonnien regeneroinnin takia kaikkea metaania ei kyetä saamaan talteen, vaan metaania joutuu puhdistuskaasujen mukana myös ilmakehään. Ruotsissa vuonna 2007 tehtyjen laitostuotteiden perusteella PSA-tekniikan metaanihäviön mediaani oli 1,8 % kokonaismetaanista. Ilmakehään päätyvän metaanin määrää voidaan kuitenkin rajoittaa muun muassa polttamalla puhdistuskaasuseosta, mikäli sen metaanipitoisuus on tarpeeksi korkea tai käyttämällä metaanin katalyyttistä hapetusta. PSA-kolonnien puhdistuskaasua käsittelevien laitosten metaanihäviön mediaani oli 0.7 %. [3]

Biokaasulaitoksen koko vaikuttaa valittua jalostustekniikkaa enemmän puhdistetun biometaanin yksikkökustannuksiin. Investointikustannukset eivät ole myöskään muuttuneet merkittävästi 2010-luvulla. Valittu jalostustekniikka vaikuttaa kuitenkin, miten käyttö- ja huoltokustannukset jakautuvat pääasiassa sähkö-, työvoima-, kemikaali- ja vesikustannusten kesken. [1] Yhden PSA-yksikön on esitetty esimerkiksi kuluttavan 700 — 1100 kJ per biokaasun normaalikuutio. Toisaalta metaaninhukkaa vähentävä sykli kulutti 4 500 kJ tai 2 680 kJ per biokaasukuutio riippuen käytetystä adsorbentista. Käytetyn syklin ja adsorbentin lisäksi myös puhdistettavan biokaasun koostumus vaikuttaa laitteiston energiankulutukseen [22] PSA-yksiköiden keskinäisen energiankulutuksen vertailu on siis haastavaa.

PSA-tekniikka on ollut pitkään yksi eniten käytetyistä kaasunerotusmetodeista teollisuudessa. Laitteisto kuluttaa verrattain vähän energiaa, sen investointikustannukset ovat pienet ja se on turvallinen. [23] Tekniikka on kompakti ja se soveltuu myös pienille tilavuusvirroille [17]. Sopivalla adsorbenttivalinnalla tekniikka mahdollistaa myös happi- ja typpimolekyylien erotuksen jalostuksen yhteydessä. Tämä voi olla hyödyllistä esimerkiksi biokaasulaitoksissa, joissa ilmaa käytetään primääriseen rikkivedyn poistoon. [3] Varsinaisessa puhdistusprosessissa ei tarvita myöskään vettä tai kemikaaleja [23]. Toisaalta osassa tutkimuskatsauksissa PSA-puhdistusta sanotaan kalliiksi käyttää ja investoida sekä prosessia kuvaillaan monimutkaiseksi [17], [23]. Usein kirjallisuuskatsauksissa käsitellään monta tekniikka hyvin tiiviisti, minkä takia ristiriitaisilta tuntuvat väitteet voivat selittyä muun muassa käytetyillä rajauksilla tai vertailun kohteilla.

Ajoneuvojen polttoaineena käytetyn biokaasun varastointi tapahtuu noin 250 bar paineessa, mikä tarkoittaa biometaanin kompressoitotarvetta riippumatta valitusta biokaasun jalostustekniikasta [3]. Toisaalta energiantarve paineistuksessa ei kasva lineaarisesti, kuten kuvasta 8 nähdään, vaan energiaintensiivisintä kompressiota ei tarvitse tehdä enää PSA-laitteiston jälkeen.



Kuva 8. Biometaanin paineistukseen tarvittava energia, kun kaasu jäädytetään lämpötilakäyrän mukaisesti. Kompressorin isentrooppinen hyötysuhde on 0,85 ja moottorin hyötysuhde 0,9. Perustuu lähteeseen [3]

Kaasun paineistukseen tarvittavaan energiaan vaikuttaa kaasun lämpötila, sen ominaislämpökapasiteettien suhde (c_p/c_v), kaasun tilavuus, tulo- ja lähtöpaine sekä kompressorin hyötysuhde. Edellä c_p tarkoitti ominaislämpökapasiteettia vakioaineessa ja c_v vakiotilavuudessa. Metaanin ja hiilidioksidin lämpökapasiteettien suhteet ovat hyvin lähellä toisiaan, joten kuvaa 8 voidaan käyttää myös biokaasun paineistuksen energiankulutuksen arviointiin. [3]

2.5 Biokaasulaitosten tulevaisuus

Biokaasulaitosten potentiaali on tunnettu melko pitkään, mutta tähän asti niiden merkitys Suomen energiasektorille on ollut pieni. Myöskään kierrätetyille ravinteille ei ole vielä muodostunut todellisia markkinoita, vaan teollisuuslaitosten kokoluokassa toimivat biokaasulaitokset joutuvat tarjoamaan ne usein ilmaiseksi paikallisille viljelijöille. Loppuotteiden alhaisen hinnan takia suuret biokaasulaitokset ovat pärjänneet taloudellisesti pieniä yksiköitä paremmin, koska ne ovat voineet veloittaa jätteenkäsittelymaksuja. Suomalaisiin laitoksiin sijoitetun pääoman tuottoasteen (ROI, %) trendi oli laskeva vuosina 2011 — 2017. Alhainen tuotto on vaikuttanut investointien määrään. Toisaalta suuret laitokset näkevät kierrätettyjen ravinteiden ja biokemikaalien markkinoilla tulevaisuuden potentiaalia ja uskovat kuluttajien kiinnostuksen kasvavan kotimaisena ja uusiutuvana brändättyyn energiaan. [5]

Pienet biokaasulaitokset toimivat yleensä maatalojen yhteydessä ja niissä pienempi taloudellinen tuottavuus voi olla hyväksyttävää, koska ne tarjoavat maatilalle myös muita palveluja, kuten lannan käsittelyä ja ravinteiden kiertoa. Muun muassa trendit maatalojen

koon kasvussa ja luomuviljelyssä lisäävät kiinnostusta pieniin biokaasulaitoksiin. Biokaasureaktorin kustannustehokkuus on sitä parempi mitä suurempi sen käsittelymäärä on. Luomuviljelyn taas nähdään lisäävän maatalojen yhteistyötä ravinteiden kierron parantamiseksi, mitä yhteinen biokaasureaktori voisi tukea. Poliittiset toimet voisivat tukea koko alaa paremmin, jos ne huomioisivat sektorin energiatuotannon lisäksi myös sen muut positiiviset vaikutukset kiertotalouteen. [5]

3. KAASUN JALOSTUKSEN ENERGIAKULUTUKSEN LASKENTA

Mustankorkea Oy:n biokaasulaitos sijaitsee Jyväskylässä Keski-Suomessa. Laitoksen käsittelykapasiteetti on noin 19 000 tonnia, mikä koostuu 13 000 tonnista biojätettä, 5 000 tonnista puhdistamolietettä ja 1 000 tonnista lantaa. Kapasiteetin nosto 30 000 tonniin on arvioitu mahdolliseksi. Käytetyt raaka-aineet kerätään Keski-Suomen alueelta. Laitoksen tuotanto vuodessa on noin 2,6 — 2,8 Nm³ biokaasua, joista jalostetaan 1,5 — 1,8 miljoonaa Nm³ biometaania. Energiämäärällisesti tuotanto vastaa 15 000 — 18 000 MWh energiaa. Mustankorkean biokaasulaitos käyttää mädätykseen kuiva-prosessia, millä pyritään säästämään vettä ja energiaa verrattuna perinteiseen märkäprosessiin. Tuotettu biokaasu jalostetaan PSA-tekniikalla biometaaniksi ja biokaasulaitoksen kiinteästä käsittelyjäännöksestä tuotetaan jätekeskuksen alueella sijaitsevassa kompostointilaitoksessa multa- ja maanparannustuotteita. Jalostettu biometaani myydään liikennepolttoaineeksi kaasuautoihin. [24]

Kandidaatintyön laskennallinen osuus koostuu Mustankorkean biokaasulaitoksen kaasun jalostuksen energiakustannuslaskennasta sekä yksinkertaisesta biokaasun jalostuksen ympäristövaikutustarkastelusta. Ympäristövaikutustarkastelussa PSA-jalostuksen hiilidioksidivaikutusta verrataan tilanteeseen, jossa jalostamaton biokaasu hyödynnettäisiin mahdollisessa biokaasulaitoksen CHP-yksikössä. Tulokset lasketaan käyttämällä lähtöarvona PSA-laitteiston nimellistehoihin perustuvaa energiankulutusta sekä laitteistosta mitattua todellista energiankulutusta. Nimellistehoihin perustuva kustannuslaskenta on mielenkiintoista toteuttaa mitattuun tietoon perustuvan laskennan rinnalla, koska menetelmä on yksinkertainen eikä sen toteuttamiseen olisi tarvittu laitteista erillisesti mitattua tehotietoa. Taulukkoon 2 on listattu supistettu PSA-laitteiston laitejaottelu esimerkinomaisilla tehotiedoilla laskennan esittelemiseksi. Tarkka Mustankorkean liiketoimintaan liittyvät tieto on jätetty työn tausta-aineistoon.

Taulukko 2. *Esimerkkilaskennassa käytetyt PSA-laitteiston komponentit ja niiden tehotiedot*

Komponentti	Teho [kW]
Kompressori moottori	100
Moottori tuuletin	5
Vakuumpumppu	50
Laitteistohuoneen lämmitys	30
Varastointikompressori moottori	100

PSA-jalostuksen energiankulutus muodostuu taulukon 2 mukaisesti pääasiallisesti biokaasun paineistuksesta prosessipaineeseen, komponenttien jäädytyksestä, alipaineen muodostuksesta PSA-kolonniin regenerointivaiheeseen, laitoshuoneen lämmityksestä ja biometaanin paineistuksesta korkeapaineeseen varastointisäiliöön. Laitteiden käyttöaikojen eroja on huomioitu kertomalla kunkin laitteen nimellisteho kulutuskertoimella. Kulutuskertoimen maksimiarvo on 1. Lisäksi PSA-yksikön kompressorien ja vaakuumpumppujen moottorien hyötysuhteet on otettu huomioon, koska yksittäisistä komponenteista niiden tehontarpeet ovat suurimmat. Taulukon 2 arvoja käsitellään esimerkiksi laskennassa niin kuin laitteistokohtaiset kulutuskertoimet ja mahdolliset hyötysuhteet olisi jo huomioitu niissä.

Laitteistojen tehotiedot ja hyötysuhteet on ilmoitettu maksimivirtaaman perusteella ja laskennassa mallinnetaan tilannetta, jossa jalostusyksikkö toimii osateholla. Tämän takia energiatehokkuutta parantava kompressorin moottorin taajuussäätö tulee huomioida. Laskennassa taajuussäädön vaikutus kompressorien tehontarpeeseen on huomioitu kertomalla maksimitehontarve käsiteltävän kaasuvirran ja maksimivirran suhteella. Kyseinen approksimaatio taajuussäädölle on puhtaasti matemaattinen, minkä vuoksi energiankulutus laskettiin esimerkissä myös ilman moottorien taajuussäätöä eli kuvitteellisessa tilanteessa, jossa kaasuvirtaama on maksimia pienempi, mutta laitteisto käy sen maksimiteholla. Jälkimmäisen tavan avulla laskennassa käytetyn taajuussäädön approksimaation vaikutuksen suuruudesta saadaan käsitys. Näin nimellistehoihin perustuvalla energiankulutukselle voitaisiin mahdollisesti toteuttaa myös karkeaa epävarmuustarkastelua, jos mittauksista perustuvaa energiankulutustietoa ei olisi saatavilla. Kompressorin hyötysuhteen riippuvuus kuormasta ei yleensä ole kovin merkittävä, joten hyötysuhteiden on oletettu vastaavan maksimikuorman hyötysuhteiden arvoja [3].

Esimerkilaskennassa kaasuvirtaamalle käytetään kuvitteellista arvoa $250 \text{ Nm}^3 / \text{h}$ ja maksimivirtaamana pidetään $500 \text{ Nm}^3 / \text{h}$. Kustannuslaskennassa tarvittava biometaanin tilavuusvirta approksimoidaan yhtä suureksi biokaasuvirran kanssa. Mustankorkean tuottaman biometaanin sisältö on eritelty taulukossa 3. Taulukkoon 3 on myös listattu kunkin komponentin tiheydet sekä tilavuusprosenttien perusteella laskettu kaasuseoksen tiheys. Tiheydet on ilmoitettu normaali-ilmanpaineessa (101,3 kPa) ja $0 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilassa, mikä vastaa normaalikuution (Nm^3) tilaa.

Taulukko 3. Mustankorkean tuottaman biometaanin koostumus sekä komponenttien ja kaasuseoksen tiheydet (0 °C ja 101,3 kPa) [25]–[30]

Biometaanin koostumus	Pitoisuus [v-%]	Tiheys [kg / m ³]
CH ₄	0,982	0,717
CO ₂	0,006	1,977
O ₂	0,004	1,429
N ₂	0,008	1,250
H ₂	0,0002	0,090
YHT	1,00	0,732

Kustannuslaskennassa sähkön hinnalle on käytetty Suomen keskisuuren teollisuuden keskimääräistä sähköhintaa (8,5 snt per kWh) vuonna 2019, joka sisältää energia- ja siirtomaksun sekä verot [31]. PSA-jalostuksen hinta tuotettua biometaanikiloa kohden on laskettu työssä käytetyn mallin mukaisesti seuraavasti

$$Hinta_{jalostus} = \frac{Hinta_{sähkö} \cdot P_{PSA} \cdot t}{\dot{V} \cdot \rho \cdot t} \quad (1)$$

missä P_{PSA} on jalostuksen ja paineistuksen tehontarve, t on aika, \dot{V} on biometaanin tilavuusvirta ja ρ on biometaanin tiheys. Biokaasun jalostuksen ympäristötarkastelussa käytetyt polttoaineiden alemmat teholliset lämpöarvot on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Tilastokeskuksen polttoaineluokitus 2020 mukaiset alemmat lämpöarvot [32]

	Tehollinen (alempi) lämpöarvo
Biometaani	36 MJ / m ³
Moottoribensiini	41,9 GJ / t
Teollinen biokaasu	28 MJ / m ³

Moottoribensiinin päästökertoimena laskennassa käytettiin arvoa 66,8 t CO₂ / TJ, jossa polttoaineen bio-osuuden oli huomioitu olevan 9,3 % tilavuudesta [32]. Sähköntuotannon päästökertoimena käytettiin suomalaisen sähköntuotannon viiden vuoden keskiarvoa 158 kg CO₂ per MWh [33]. Biokaasutuotannon korvaama bensiinin massa laskettiin polttoaineista saatavan energian avulla seuraavasti

$$\dot{V} \cdot t \cdot LHV_{biometaani} = LHV_{bensini} \cdot m_{bensini} \quad (2)$$

missä LHV on alempi tehollinen lämpöarvo. Ilmakehään pääsemättömän fossiilisen polttoaineen määrä laskettiin bensiinin päästökertoimen avulla

$$m_{CO_2} = m_{bensiiini} \cdot LHV_{bensiiini} \cdot x_{bensiiini} \quad (3)$$

missä x on päästökerroin. PSA laitoksen kuluttaman sähkön päästöt laskettiin yhtälöllä (4)

$$m_{CO_2} = P_{PSA} \cdot t \cdot x_{sähkö} \quad (4)$$

Hiilidioksidipäästöjen potentiaalinen vähennys sähköntuotannossa, jos biokaasu olisi poltettu laitoksen CHP-yksikössä laskettiin seuraavasti

$$m_{CO_2} = \dot{N} \cdot t \cdot LHV_{biokaasu} \cdot t \cdot x_{sähkö} \quad (5)$$

Laskennan yksinkertaistamiseksi yhtälössä (5) on oletettu, että palamisessa vapautuva energia kyettäisiin muuntamaan kokonaisuudessaan sähköenergiaksi. Tämä ei ole mahdollista, mutta myös syntyvää lämpöä voidaan osittain hyödyntää biokaasulaitoksen prosesseissa, kuten mädätysreaktorin lämmityksessä. Jos reaktorin lämmitys tapahtuisi biometaanin lämmön sijasta sähköllä, laskennan virhe pienenesi huomattavasti. Metaanihäviot kaasun jalostuksessa ja CHP-poltossa on oletettu yhtä suuriksi, joten niitä ei huomioida laskennassa. Yhtälöillä (3 – 5) laskettujen hiilidioksidimassojen erotuksen jälkeen saatava tulos tarkoittaa sitä, kuinka paljon bensiinin poltosta syntyvää fossiiliperäistä hiilidioksidia on kyetty välttämään biokaasulaitoksen tuotannolla aikayksikköä kohti, kun jalostuksen vaatiman sähkön päästöt ja vaihtoehto biokaasun hyödyntämisestä suoraan sähköinä on huomioitu. Vältetty hiilidioksidi suhteutetaan lopuksi yhtä biometaanikiloa kohden biometaanin tiheyden avulla, jotta säästö on intuitiivisemmassa muodossa.

4. PAINEENVAIHTELUADSORPTIOJALOSTUKSEN ANALYYSI

Luvussa 3 esitetyn laskennan esimerkitulokset on esitetty taulukossa 5. Vertailun vuoksi taulukossa on lisäksi esitetty tulokset, jotka on laskettu ilman moottorien taajuussäätöä.

Taulukko 5. *PSA-jalostuksen ja paineistuksen sähkötehon tarve laskettuna luvussa 3 esitetyn laskennan ja taulukon 2 esimerkkikomponenttien perusteella, jalostuksen hinta ja liikennepolttoaineena käytetyn biometaanin säästämä fossiiliperäinen CO₂ verrattuna biokaasun CHP-käyttöön*

	Sähköteho [kW]	Hinta [snt / CH ₄ kg]	CO ₂ säästö [CO ₂ kg / CH ₄ kg]
Tulos	235	10,92	1,40
Tulos ilman taajuussäätöä	285	13,24	1,36

Taulukon 5 mukaisesti 250 Nm³ biokaasun jalostuksen energiankulutukseksi saatiin taulukon 2 lähtöarvojen perusteella 500 Nm³ kapasiteetin PSA-yksiköllä 235 kWh, mikä tarkoittaisi jalostuksen hinnan olevan 10,92 snt per jalostettu biometaanikilo. Ilman taajuussäätöä laskettua hintaa ei voida suoraan käyttää virhetarkastelun maksimiarvona, mutta se on kuitenkin mielenkiintoinen, koska arvo on 21 % suurempi kuin laskettu sähköteho. Laskennallisesti taajuussäädön vaikutus on siis merkittävä, minkä takia sen todellisen vaikutuksen tunteminen olisi tärkeää mallin tarkkuuden parantamisessa. Laskennassa käytettyä approksimaatiota tulee käyttää harkiten erityisesti pienillä tilavuusvirroilla, koska approksimaation mukaan kompressoriteho laskisi lineaarisesti koko tarkasteluvälillä.

Käyttämällä nimellistehoihin perustuvan laskennan lähtöarvoina Mustankorkean PSA-yksikön todellisia nimellistehoja, tuotantokapasiteettia ja päivän keskimääräistä tilavuusvirtaa huomattiin laskennallisten energiankulutusten olevan merkittävästi mitattuja energiankulutuksia suurempia. Nimellistehojen kautta lasketut kaasun jalostuksen kustannukset olivat keskimäärin 2,5-kertaiset ja suurin virhe 37 päivän tarkasteluvälillä oli 3,8-kertainen. Virheen todettiin olevan sitä suurempi, mitä pienempi päivän keskimääräinen tuotanto oli. Tätä selittää todennäköisesti se, että biokaasua ei jalosteta jatkuvasti pienellä kaasuvirralla, vaan jalostus tapahtuu lyhyinä aikajaksoina, jolloin tilavuusvirrat ovat keskiarvoja suurempia. Mallin tarkentamiseksi laitteiston käyttöajat ja käsittelyn aikaiset tilavuusvirrat tulisi huomioida paremmin. Tämä voisi laskennassa tarkoittaa esi-

merkiksi minimitalavuusvirran määrittämistä PSA-laitteistolle. Jalostuslaitteiston käyttöaika voisi tarkentaa bioreaktorin tuotannon ja reaktoriin varastoitavan biokaasukapasiteetin avulla. Myös tarkat tilavuusvirrat sekä käsittelemättömälle että käsitellylle kaasulle parantaisivat mallin luotettavuutta. On kuitenkin perusteltua pohtia, kannattaako mallia lähteä tarkentamaan uusilla parametreilla, joiden määrittäminen tai mittaaminen voi vähentää helposti lähestyttäväksi ja nopeaksi tarkoitetun laskennan hyötyjä. Mitattu energiankulutus mahdollistaa erilaisten sovitteiden muodostamisen energiankulutuksen ja tuotannon välille, joiden käyttö olisi tällä hetkellä tarkempaa ja mahdollisesti myös nopeampaa kuin esitetyn laskentatavan.

Esimerkkilaskennan perusteella henkilöautossa käytetty biometaanikilo säästäisi ilmakehästä noin 1,4 kg fossiiliperäistä hiilidioksidia verrattuna tilanteeseen, jossa sama energiamäärä tuotettaisiin autoon bensiinillä ja biokaasu käytettäisiin jalostamattomana CHP-tuotantoon. Biokaasun jalostuksen ilmastovaikutusten todettiin olevan positiivisia myös käyttämällä mitattua energiankulutustietoa Mustankorkean PSA-laitteistosta. Tavoite hiilidioksidilaskennalle oli biokaasun hyödynnysmenetelmien vertailu ilmastovaikutusten näkökulmasta. Tulokset tukevat käsitystä, että biokaasun jalostus biometaaniksi olisi ympäristöystävällinen tapa tuottaa liikennepolttoainetta.

Biokaasun jalostuksen hyöty hiilidioksidipäästöjen vähennyksessä on todellisuudessa esitetyn laskennan mukaista säästöä suurempi, vaikka lähtöarvona käytettäisiin mitattua energiankulutusta. Suomen sähköntuotannon uusiutuvien energianlähteiden käyttö on viimevuosien aikana lisääntynyt ja energiasektorin päästöjen trendi on ollut laskeva [34], [35]. Viiden vuoden liukuvana keskiarvona laskettu sähköntuotannon CO₂-päästö on siis tämänhetkistä sähköntuotannonpäästöä suurempi. Huomioitavaa on myös se, että esimerkiksi 2018 vuonna 23 % Suomen käyttämästä sähköstä tuotiin ulkomailta [36]. Myös tuotavan sähköön voidaan olettaa laskevan Suomessa käytetyn sähkön keskimääräisiä päästöjä. Esimerkiksi Ruotsin sähköntuotannon CO₂-päästökerroin on noin 13 kg per MWh [37]. Sähköön päästökerroin ja potentiaalinen CHP-yksikön sähköntuotto on yksinkertaistettu tietoisesti siten, että yksinkertaistuksen vaikutus on biokaasun jalostuksen laskennallista ilmastovaikutusta heikentävä. Näin positiivisen tuloksen todistusvoima on merkittävämpi.

Absoluuttisen CO₂-säästön tarkkuutta voitaisiin lisätä esimerkiksi käyttämällä tarkempaa sähköön päästökerrointa. Lisäksi CHP-yksikön tuottaman sähköön ja hyödynnettävän lämmön määrään tarkentaminen ja lämmön vaihtoehtoisen tuotantotavan huomiointi olisi säästetyn hiilidioksidimäärän kannalta merkittävää. Myös Mustankorkean tuottaman biometaanin ja vaihtoehtoisen fossiilisen polttoaineen kattava päästövertailu olisi mielenkiintoista toteuttaa. Tällaisessa tarkastelussa analyysi tulisi toteuttaa koko biometaanin tuotantoprosessille sekä perehtyä fossiilisten polttoaineiden koko elinkaaren päästöihin.

Tietoa omassa laitoksessa tuotetun biometaanin ympäristöhyödyistä voisi käyttää esimerkiksi tuotteiden markkinoinnissa kuluttajille sekä viestinnässä päättäjille ja investoijille.

5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Biokaasun tuotannolla on positiivisia vaikutuksia sekä energiantuotannon että ravinteiden kierron kannalta. Biojätteen, puhdistamolietteen ja lannan käsittely on yhteiskunnan kannalta välttämätöntä ja biokaasulaitokset vastaavat omalta osaltaan tähän tarpeeseen. Laitosprosessin suunnittelu perustuu laitoksessa käytettäviin raaka-aineisiin. Esi-käsittely, mädätys ja kaasun jalostus voidaan toteuttaa useilla erilaisilla tekniikoilla. Esimerkiksi mikään biokaasun jalostustekniikka ei ole noussut muita selvästi paremmaksi, vaan tekniikan valinta tulee tehdä laitospohjaisesti. Biokaasua voidaan tuottaa sekä teollisen kokoluokan laitoksissa että maatalojen yhteydessä toimivissa pienemmissä reaktoreissa. Suurempien biokaasulaitosten taloudellinen kannattavuus on ollut pienempiä parempi, mutta kasvupotentiaalia nähdään tulevaisuudessa molemmissa kokoluokissa.

PSA-tekniikka on varteenotettava vaihtoehto kaasun jalostukseen laitoksen kokoluokasta riippumatta. Kandidaatintyössä on esitetty laskentatapa PSA-yksikön energiankulutuksen arviointiin komponenttien nimellistehojen perusteella. Esitetyn laskennan tulokset energiankulutukselle eroavat kuitenkin laitteiden mitatusta energiankulutuksesta, joten sitä tulisi tarkentaa esimerkiksi huomioimalla todellinen biokaasuvirta ja laitteiston käyttöaika entistä paremmin. Tällä hetkellä nopeaan kustannusanalyysiin kannattaa todennäköisesti käyttää mitattuihin energiankulutuksiin pohjautuvia sovitteita, jos laitoksessa on mahdollisuus mittausten toteuttamiseen.

Biokaasun jalostuksen ilmastohyöty kyettiin toteamaan myös tässä työssä. Vertailun mukaan fossiilisia hiilidioksidipäästöjä vähennetään enemmän käyttämällä biometaanin autojen polttoaineena kuin polttamalla se jalostamattomana biokaasulaitoksen CHP-yksikössä. Laskennassa tehdyt yksinkertaistukset valittiin siten, että ne vähensivät jalostuksen laskennallista ilmastovaikutusta. Tämän takia on perusteltua väittää, että biokaasun jalostuksella on mahdollista saavuttaa positiivisia ilmastovaikutuksia. Mielenkiintoinen laskentasuunta olisi koko biokaasun tuotannon laitospohjaisen ilmastovaikutuksen laskenta. Tällaista tietoa voisi mahdollisesti hyödyntää tehokkaasti biometaanin markkinoinnissa ja yrityksen viestinnässä erityisesti, jos se samalla suhteutettaisiin vaihtoehtoihin fossiilisiin polttoaineisiin.

LÄHTEET

- [1] Q. Sun, H. Li, J. Yan, L. Liu, Z. Yu, X. Yu, Selection of appropriate biogas upgrading technology-a review of biogas cleaning, upgrading and utilisation, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 51, 2015, pp. 521–532.
- [2] L. Yang, X. Ge, C. Wan, F. Yu, Y. Li, Progress and perspectives in converting biogas to transportation fuels, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 40, 2014, pp. 1133–1152.
- [3] F. Bauer, C. Hulteberg, D. T. Persson Tobias, Biogas upgrading - review of commercial technologies, SGC Rapport 2013:270, Malmö 2012, 84 p., Saatavissa: <http://www.sgc.se/ckfinder/userfiles/files/SGC270.pdf>
- [4] S. Huttunen, K. Manninen, P. Leskinen, Combining biogas LCA reviews with stakeholder interviews to analyse life cycle impacts at a practical level, *J. Clean. Prod.*, vol. 80, 2014, pp. 5–16.
- [5] E. Winquist, P. Rikkinen, J. Pyysiäinen, V. Varho, Is biogas an energy or a sustainability product? - Business opportunities in the Finnish biogas branch, *J. Clean. Prod.*, vol. 233, 2019, pp. 1344–1354.
- [6] Työ- ja elinkeinoministeriö, Maa- ja metsätalousministeriö, Ympäristöministeriö, Liikenne- ja viestintäministeriö, Valtionvarainministeriö, Biokaasuohjelmaa valmisteleavan työryhmän loppuraportti, Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja 2020:3, 2020, s. 70, Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-327-482-2>
- [7] D. Mulvaney, *Green Technology: An A-to-Z Guide*, SAGE Publications, Thousand Oaks Kalifornia, USA, 2011, 524 p.
- [8] M. Tabatabaei, M. Aghbashlo, E. Valijanian, H. Kazemi Shariat Panahi, A.-S. Nizami, H. Ghanavati, A. Sulaiman, S. Mirmohamadsadeghi, K. Karimi, A comprehensive review on recent biological innovations to improve biogas production, Part 1: Upstream strategies, *Renew. Energy*, vol. 146, 2020, pp. 1204–1220.
- [9] A. Wellinger, J. Murphy, D. Baxter, *The biogas handbook: science, production and applications*, Woodhead Publishing, Oxford, Englanti 2013, 476 p.
- [10] H. K. Balsora, P. Gautam, M. K. Mondal, Enrichment of Biogas from Biodegradable Solid Waste—A Review, Springer, Cham, 2017, pp. 93–106.
- [11] S. Pavi, L. E. Kramer, L. P. Gomes, L. A. S. Miranda, Biogas production from co-digestion of organic fraction of municipal solid waste and fruit and vegetable waste, *Bioresour. Technol.*, vol. 228, 2017, pp. 362–367.
- [12] S. Rasi, E. Lehtonen, E. Aro-Heinilä, J. Höhn, H. Ojanen, J. Havukainen, V. Uusitalo, K. Manninen, E. Heino, N. Teerioja, R. Anderson, V. Pyykkönen, S. Ahonen, S. Marttinen, S. Pitkänen, M. Hellstedt, J. Rintala, From Waste to Traffic Fuel -projects: final report: Finnish case regions, MTT Report 50, Jokioinen 2012, 75 p. Saatavissa: <http://www.mtt.fi/mttraportti/pdf/mttraportti50.pdf>
- [13] Z. Liu, *Gas biofuels from waste biomass: principles and advances*, Nova Science

- Publishers, Hauppauge, New York, USA, 2014, 228 p.
- [14] Komission asetetus (EU) N:o 142/2011, EU, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 20.4.2020): <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2011/142/oj>
- [15] J. Grim, P. Malmros, A. Schnürer, Å. Nordberg, Comparison of pasteurization and integrated thermophilic sanitation at a full-scale biogas plant – Heat demand and biogas production, *Energy*, vol. 79, no. C, 2015, pp. 419–427.
- [16] E. Ryckebosch, M. Drouillon, H. Vervaeren, Techniques for transformation of biogas to biomethane, *Biomass and Bioenergy*, vol. 35, no. 5, 2011, pp. 1633–1645.
- [17] O. Awe, Y. Zhao, A. Nzihou, D. Minh, N. Lyczko, A Review of Biogas Utilisation, Purification and Upgrading Technologies, *Waste and Biomass Valorization*, vol. 8, no. 2, 2017, pp. 267–283.
- [18] C. Grande, Biogas Upgrading by Pressure Swing Adsorption, Biofuel's Engineering Process Technology, IntechOpen, 2011, Saatavissa (22.4.2020): <https://www.intechopen.com/books/biofuel-s-engineering-process-technology/biogas-upgrading-by-pressure-swing-adsorption>
- [19] B. Smit, J. Reimer, C. Oldenburg, I. Bourg, Introduction to Carbon Capture and Sequestration, Imperial College Press, Lontoo, Englanti, 2014, 597 p.
- [20] T. Patterson, S. Esteves, R. Dinsdale, A. Guwy, An evaluation of the policy and techno-economic factors affecting the potential for biogas upgrading for transport fuel use in the UK, *Energy Policy*, vol. 39, no. 3, 2011, pp. 1806–1816.
- [21] F. Bauer, T. Persson, C. Hulteberg, D. Tamm, Biogas upgrading – technology overview, comparison and perspectives for the future, *Biofuels, Bioprod. Biorefining*, vol. 7, no. 5, 2013, pp. 499–511.
- [22] R. Augelletti, M. Conti, M. C. Annesini, Pressure swing adsorption for biogas upgrading. A new process configuration for the separation of biomethane and carbon dioxide, *J. Clean. Prod.*, vol. 140, 2017, pp. 1390–1398.
- [23] A. I. Adnan, M. Y. Ong, S. Nomanbhay, K. W. Chew, P. L. Show, Technologies for biogas upgrading to biomethane: A review, *Bioengineering*, vol. 6, no. 4, 2019.
- [24] Mustankorkean biokaasulaitos – polttoainetta paikallisista jätteistä, Mustankorkea, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 20.4.2020): <https://mustankorkea.fi/tuotteet/biokaasu/biokaasulaitos/>
- [25] Thermophysical Properties of Hydrogen, NIST, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 20.4.2020): <https://webbook.nist.gov/cgi/fluid.cgi?ID=C1333740&Action=Page>
- [26] Thermophysical Properties of Nitrogen, NIST, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 20.4.2020): <https://webbook.nist.gov/cgi/fluid.cgi?ID=C7727379&Action=Page>
- [27] Thermophysical Properties of Oxygen, NIST, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 20.4.2020): <https://webbook.nist.gov/cgi/fluid.cgi?ID=C7782447&Action=Page>
- [28] Thermophysical Properties of Carbon dioxide, NIST, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 20.4.2020): <https://webbook.nist.gov/cgi/fluid.cgi?ID=C124389&Action=Page>
- [29] Thermophysical Properties of Methane, NIST, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 20.4.2020):

<https://webbook.nist.gov/cgi/fluid.cgi?ID=C74828&Action=Page>

- [30] Biokaasu tuoteseloste, Mustankorkea, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 20.4.2020): <https://mustankorkea.fi/wp-content/uploads/2019/11/tuoteseloste-biokaasu-2019.pdf>.
- [31] Sähkön hinta kuluttajatyypeittäin, Tilastokeskus, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 21.4.2020): http://www.stat.fi/til/ehi/2019/04/ehi_2019_04_2020-03-12_kuv_005_fi.html
- [32] Polttoaineluokitus 2020, Tilastokeskus, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 21.4.2020): http://www.stat.fi/tup/khkinv/khkaasut_polttoaineluokitus.html
- [33] CO₂-päästökertoimet, Motiva, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 21.4.2020): https://www.motiva.fi/ratkaisut/energian kaytto_suomessa/co2-laskentaohje_energian kulutuksen_hiilidioksidipaastojen_laskentaan/co2-paastokertoimet
- [34] Uusiutuvat energialähteet, Tilastokeskus, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 21.4.2020): <https://findikaattori.fi/fi/89>
- [35] Kasvihuonekaasupäästöt, Tilastokeskus, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 21.4.2020): <https://findikaattori.fi/fi/87>
- [36] Sähkön hankinta ja kulutus, Tilastokeskus, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 21.4.2020): <https://findikaattori.fi/fi/21>. [Viitattu: 2020].
- [37] Miljöpåverkan från el, Energi- & klimatrådgivningen i Stockholmsregionen, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 21.4.2020): <https://energiradgivningen.se/klimat/miljopaverkan-fran-el>