



OULUN YLIOPISTO
UNIVERSITY of OULU

TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

Biokaasun käyttö liikenteen polttoaineena

Mielonen Klaus-Mikael

Ohjaaja: TkT Juha Ahola

YMPÄRISTÖTEKNIikka

Kandidaatintyö

Maaliskuu 2017

TIIVISTELMÄ

OPINNÄYTETYÖSTÄ Oulun yliopisto Teknillinen tiedekunta

Koulutusohjelma (kandidaatintyö) Ympäristötekniikan koulutusohjelma		Pääaineopinnojen ala (lisensiaatintyö)	
Tekijä Mielonen Klaus-Mikael		Työn ohjaaja yliopistolla Ahola Juha, TkT	
Työn nimi Biokaasun käyttö liikenteen polttoaineena			
Opintosuunta	Työn laji Kandidaatintyö	Aika Maaliskuu 2017	Sivumäärä 31
<p>Tiivistelmä</p> <p>Suomi tavoittelee merkittäviä vähennyksiä kasvihuonepäästöihin. Hallitus on linjannut, että sen tavoitteena on lisätä päästöttömän, uusiutuvan energian käyttöä. Uusiutuvan energian osuus tulisi 2020-luvulla nousta yli 50 prosenttiin. Kasvihuonepäästöjen vähentämisessä liikenteellä on merkittävä rooli. Euroopan unioni on asettanut jäsenmailleen tavoitteita, joiden avulla jäsenmaiden on pystyttävä vähentämään liikenteestä aiheutuvia hiilidioksidipäästöjä. Suomen hallitus on yhdessä EU:n tavoitteiden kanssa luonut Suomelle omat tavoitteet kohti hiilineutraalimpaa liikennettä.</p> <p>Liikenteen kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi nykyiset polttoaineet on korvattava uusiutuvilla tai vähäpäästöisemmillä polttoaineilla tai käyttövoimilla. Biokaasun käyttäminen liikenteen polttoaineella mahdollistaa liikenteestä syntyvien hiilidioksidipäästöjen vähentämisen.</p> <p>Tässä kandidaatintyössä perehdytään biokaasun tuotantoon, tuotantoteknologioihin ja sen käyttöön liikenteen polttoaineena. Työssä tuodaan esille myös biokaasuautoilun kustannukset verrattuna fossiilisiin liikenteen polttoaineisiin. Tutkimuksen tavoitteena on selvittää, onko biokaasun käyttäminen liikennepolttoaineena todellinen kustannustehokas vaihtoehto päästöjen vähentämiseksi.</p> <p>Biokaasun tuotanto on viimeisen viiden vuoden aikana kasvanut ja markkinoiden kehitystä on vauhdittanut uusien toimijoiden tulo markkinoille. Biokaasun hyödyntämisessä on valtavasti potentiaalia, sillä Suomessa biokaasulaitosten määrä on kasvanut reilusti 2000-luvulla. Biokaasulaitokset pystyvät käyttämään lähialueen teollisuuden ja muiden toimialojen biohajoavia jätteitä biokaasun tuotannossa. Näin pystytään luomaan lähenergiaa ja hyödyntämään syntynyttä mädätysjäännöstä mm. lannoitteena. Biokaasun jakelua ollaan lisäämässä myös perinteisen maakaasun jakeluverkoston ulkopuolisille alueille. Tämän mahdollistaa biokaasun logistiikkateknologian kehittyminen – erilaiset konttiratkaisut sekä biokaasun nesteytysteknologia, jotka mahdollistavat biokaasun taloudellisen kuljettamisen. Nämä toimenpiteet ovatkin välttämättömiä, jotta kuluttajat voivat hankkia kaasukäyttöisen ajoneuvon. Myös ajoneuvojen merkivalikoima on laajentunut viimeisten vuosien aikana, joka mahdollistaa laajemman valikoiman myös autojen hintojen osalta.</p> <p>Työssä tarkasteltiin henkilöauton (Audi A3) sekä pakettiauton (Volkswagen Caddy) kustannuksia ns. Total Cost of Ownership (TCO) mallin mukaisesti. Biokaasuvaihtoehto tuli tarkastelujaksolla halvemmaksi niin henkilöauto- kuin pakettiautovertailussa, kun vaihtoehtoina olivat vastaavat autot joko benssiini- tai dieselversiona. Koska biokaasu vaihtoehto oli edullisin, voidaan todeta, että biokaasu on liikenteen todellinen vaihtoehto siirryttäessä hiilineutraaliin liikenteeseen.</p>			
Muita tietoja			

Sisällys

TIIVISTELMÄ.....	2
Lyhenneluettelo	4
1 Johdanto.....	5
1.1 Tutkimusongelman kuvaaminen ja tutkimuksen tavoitteet	6
1.2 Tutkimuksen laajuus ja rakenne	6
2 Mädättämällä tuotettu biokaasu.....	7
2.1 Biokaasun tuotantomäärät Suomessa	8
2.2 Biokaasun raaka-ainesyötöet ja niiden potentiaali.....	10
2.2.1 Eläinperäiset raaka-aineet biokaasun tuotannossa.....	10
2.2.2 Jätevedenpuhdistamon liete.....	11
2.2.3 Kasvibiomassa	13
2.3 Mädättämällä valmistetun biokaasun tuotantoprosessi	13
2.3.1 Erilaiset prosessit ja niihin liittyvät laitokset.....	13
2.3.2 Mädätysprosessin sivutuotteet.....	15
2.4 Biokaasun käsittely ja hyödyntäminen	16
2.4.1 Biokaasun koostumus	16
2.4.2 Biokaasun jalostus	17
3 Biokaasu liikenteen polttoaineena.....	19
3.1 Biokaasun varastointi	20
3.2 Biokaasun kuljetus.....	21
3.3 Biokaasu ajoneuvot	22
3.3.1 Henkilöautot	22
3.3.2 Raskasliikenne.....	23
3.4 Kaasuautojen kustannusanalyysi	24
4 Johtopäätökset	26
5 Yhteenveto.....	27
Lähdeluettelo	28

Lyhenneluettelo

Lyhenteet

CNG Paineistettu maakaasu (Compressed natural gas)

C/N hiili/typpi suhde

CBC Paineistettu biokaasu (Compressed bio gas)

LBG Nesteytetty biokaasu (Liquefied biogas)

LNG Nesteytetty maakaasu (Liquefied natural gas)

SNG Synteettinen maakaasu (Synthetic natural gas)

TS Kuiva-ainepitoisuus (Total Solids)

VS Orgaanisen aineen pitoisuus (Volatile Solids)

1 Johdanto

Valtioneuvosto esitti (24.11.2016) selonteon kansallisesta energia- ja ilmastostrategiasta (Energia- ja ilmastostrategia). Strategiassa kuvataan, miten Suomi aikoo vastata Euroopan unionissa sovittuihin toimenpiteisiin energijärjestelmän kehittämisessä ja kasvihuonepäästöjen vähentämisessä (2009/28/EY). Suomessa kasvihuonekaasupäästöistä lähes 80 prosenttia on peräisin energiatoimialalta – mukaan lukien liikenne (Energia- ja ilmastostrategia).

Energia- ja ilmastostrategiassa linjataan kokonaisvaltaisesti toimet, joilla saavutetaan kansallisesti ja EU-tasolla asetetut energia- ja ilmastotavoitteet. Strategia annetaan selontekona eduskunnalle vuoden 2017 alussa. Strategian valmistelun yhteydessä valmistellaan erillisinä projekteina uusiutuvan energian ohjauskeinot, sillä hallitus on linjannut tavoitteekseen lisätä päästöttömän, uusiutuvan energian käyttöä. Tavoitteena on, että uusiutuvan energian osuus 2020-luvulla nousee yli 50 prosenttiin, ja tuotannon omavaraisuus olisi silloin yli 55 prosenttia. Asetetut tavoitteet saavutetaan parhaiten, kun kasvatetaan nestemäisten biopolttoaineiden ja biokaasun tuotantoa. Hallituksen tavoite on, että vuoteen 2030 mennessä liikenteen uusiutuvien polttoaineiden osuus on 40 prosenttia. (Energia- ja ilmastostrategia).

Edellä esitetty energia- ja ilmastostrategia pohjautuu Jyrki Kataisen hallituksen aikana (2014) valmisteltuun Suomen energia- ja ilmastostrategiaan eli Energia- ja ilmastotiekarttaan 2050. Työssä tavoitteena oli luoda Suomelle strategisen tason ohjeet, joilla saavutetaan hiilineutraalimpi yhteiskunta. Tiekartan keskeisin tavoite oli arvioida keinoja, joilla voidaan vähentää kasvihuonekaasupäästöjä ~ 80-95% vuoden 1990 tasosta vuoteen 2050 mennessä. (Energia- ja ilmastotiekartta 2050). Esitetyn tiekartan mukaan liikenteen fossiiliset polttoaineet tulisi korvata biopohjaisilla polttoaineilla, kuten biomassasta valmistetuilla nestemäisillä tai kaasumaisilla polttoaineilla (Energia- ja ilmastotiekartta 2050).

Nyt esillä olevassa energia- ja ilmastostrategiassa esitetään, että biokaasulaitosten käytön ja tuotannon tukemista jatketaan nykyisellään ja lisäksi maataloudessa syntyvien biojätteiden hyödyntämistä biokaasun tuotannossa pyritään lisäämään (Energia- ja ilmastostrategia). Suomessa biopohjaisten kaasujen vuosittainen liiketoimintapotentiaali on arvioitu olevan useita satoja miljoonia euroja (Mutikainen et al., 2016). Sitran selvityksen mukaan (Mutikainen et al., 2016) biokaasuliiketoiminnan kasvun myötä voidaan entistä tehokkaammin hyödyntää eri lähteissä olevaa raaka-ainepotentiaalia sekä laajentaa biokaasu-liiketoiminnan alueellista ja toimialakohtaista vaikutuspiiriä. Tämä kaikki edellyttää sitä, että biokaasutoimialaa tulee kehittää kokonaisuutena aina moninaisten raaka-aineiden saatavuudesta ja hyödyntämisestä erilaisiin lopputuotekäyttöihin sekä materiaalikiertojen sulkemiseen (Mutikainen et al., 2016).

Nopein keino liikenteen kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi on liikenteen nykyisten polttoaineiden korvaaminen uusiutuvilla tai nykyisiä vähäpäästöisemmällä polttoaineilla tai käyttövoimilla. Biokaasu mahdollistaa Euroopan unionin ja hallituksen asettamien päästövähennysten saavuttamisen. Tässä kandidaatintyössä perehdytään biokaasun tuotantoon, tuotantoteknologioihin ja sen käyttöön liikenteen polttoaineena.

1.1 Tutkimusongelman kuvaaminen ja tutkimuksen tavoitteet

Biokaasun osuus liikenteessä käytettävistä polttoaineista on ollut vähäistä ja kaasukäyttöisiä autoja on noin 2.000 (Gasum). Energia- ja ilmastostrategian tavoitteena on kasvattaa bioenergian käyttöä yli 30%:ia vuoden 2015 tasosta. Samalla strategian tavoitteena on myös liikenteen biopolttoaineiden energiasisällön fyysisen osuuden nostaminen 30%:iin vuoteen 2030 mennessä. Biokaasu on strategiassa nostettu sähkön rinnalle liikenteen vaihtoehtoisena käyttövoimana ja hallitus pyrkiikin kaasukäyttöisten autojen määrän nostamiseen 50 000 autoon vuoteen 2030 mennessä. (Energia- ja ilmastostrategia 2050).

Kaasun tankkausasemaverkostoa on suunniteltu laajennettavan, jotta se vastaisi Euroopan unionin asettamia vaatimuksia vaihtoehtoisen käyttövoiman jakeluverkostolle (Kymäläinen and Pakarinen, 2015). Biokaasun jakelua voidaan tehostaa nykyisen kaasuverkoston lisäksi lisäämällä paikallisia ja helposti liikuteltavia tankkausasemia, perustamalla niitä mm. maatilan tai biojalostamon läheisyyteen (Kymäläinen and Pakarinen, 2015).

Suomessa auto- ja polttoaineverotus on EU-tasolla erittäin korkea. Tämä on johtanut siihen, että henkilöautoilun kustannukset Suomessa ovat hyvin korkeat. Suomessa liikennekäytössä olevien henkilöautojen keski-ikä Suomessa on 11,4 vuotta, kun EU-maiden keskiarvo on 8-9 vuotta. (Trafi). Liikenteen päästövähennysten saavuttaminen edellyttää autokannan uusiutumista Suomessa. Autokannan nopeampi uusiutuminen edellyttää muutoksia nykyiseen autoverotukseen.

Tässä työssä selvitetään biokaasun eri tuotantotapoja sekä vaihtoehtoja liikennekaasun jakelulle. Työssä pyritään myös tuomaan esille biokaasuautoilun kustannukset verrattuna vastaavaan bensiini- ja dieselkäyttöisen ajoneuvon kustannuksiin. Tutkimuksen tavoitteena on selvittää, onko biokaasun käyttäminen liikenteenpolttoaineena todellinen kustannustehokas vaihtoehto liikenteen päästöjen vähentämiselle.

1.2 Tutkimuksen laajuus ja rakenne

Tutkimuksen seuraavassa luvussa käsitellään, miten biokaasua tuotetaan mädättämällä. Luvussa keskitytään kuvamaan ensisijaisesti biokaasun tuotantoa eläinperäisistä raaka-aineista,

jätevedenpuhdistamolietteistä sekä kasvibiomassasta. Luvussa selvitetään mädättämällä tuotetun biokaasun tuotantoprosessi sekä biokaasun käsittely ja hyödyntäminen.

Kolmannessa luvussa käsitellään biokaasua liikenteen polttoaineena. Luvussa selvitetään kaasun jakeluun ja varastointiin liittyviä tapoja sekä esitetään kaasujoneuvoja. Luvussa vertaillaan myös kaasuautoilun kustannuksia vastaaviin bensa- ja dieselkäyttöisiin autoihin.

Luvussa neljä esitellään työn johtopäätökset. Luvussa viisi esitetään yhteenvedona ympäristön kehittämiseen liittyviä asioita, jotta biokaasun käyttö liikenteessä saavuttaa sille energia ja ilmastostrategiassa asetetun potentiaalin.

2 Mädättämällä tuotettu biokaasu

Biokaasua muodostuu erilaisten mikrobien hajottaessa orgaanista ainesta hapettomissa olosuhteissa. Suljetuissa reaktoreissa tapahtuvaa biokaasun tuotantoa kutsutaan mädätykseksi. Biokaasuuntuminen tapahtuu anaerobisissa eli hapettomissa olosuhteissa orgaanisen aineen hajotessa metaaniksi (CH_4) ja hiilidioksidiksi (CO_2). Orgaaninen aines hajoaa mikrobien vaikutuksesta, jolloin suuret orgaaniset molekyylit pilkkoutuvat pienemmiksi yhdisteiksi, ja prosessissa vapautuva energia sitoutuu metaanimolekyyleihin. (Hobson and Wheatley, 1993, p.7.)

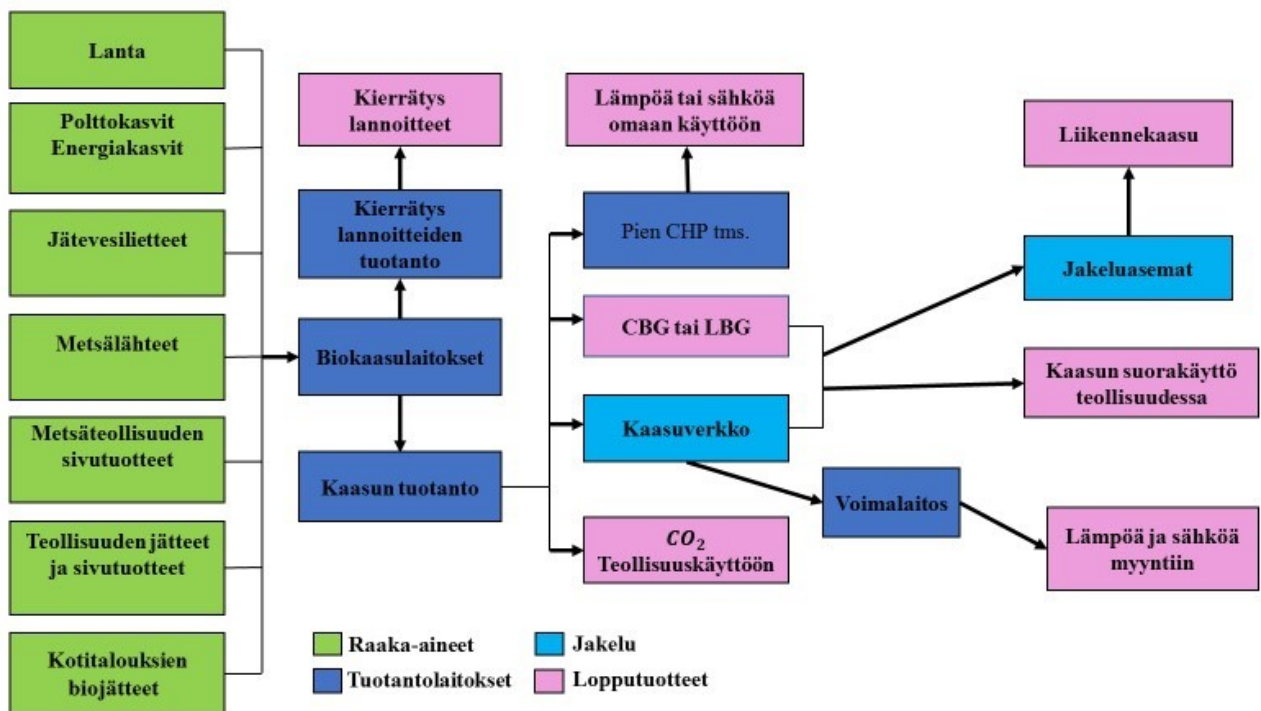
Anaerobinen hajoaminen tapahtuu neljän eri bakteeriryhmän vaikutuksesta. Prosessin ensimmäisessä vaiheessa, hydrolyysi, haponmuodostajabakteerien erittämät entsyymit hajottavat orgaanisen kiintoaineen yksinkertaisiksi liukoisiksi yhdisteiksi. Hydrolyysin jälkeen yhdisteet hajoavat happokäymisessä (asidogeneesi) haihtuviksi rasvahapoiksi. Prosessi etenee siten, että seuraavassa vaiheessa vetyä tuottavat bakteerit hajottavat rasvahapot edelleen asetaatiksi, vedyksi (H) ja hiilidioksidiksi (CO_2). Viimeistä, neljättä, vaihetta kutsutaan metanogeneesiksi. Neljännessä vaiheessa metaaninmuodostajabakteerit tuottavat metaania. Metaanin tuotannon edellytyksenä on se, että materiaalien tulee hajota etikkahapoksi tai vedyksi ja hiilidioksidiksi. (Lehtomäki et al., 2007, pp. 22–23; Mikkonen and Kauriinoja, 2011). Prosessin lopputuote on biokaasu, mikä koostuu metaanista (60-65%), hiilidioksidista (30-35%) ja syötteestä riippuen pienistä määristä vesihöyryä, typpeä, happia vetyä, ammoniakkaa ja rikkivetyä (Mikkonen and Kauriinoja, 2011; Lehtomäki et al., 2007)

Syntynyttä biokaasua voidaan käyttää polttoaineena sähkön ja lämmön tuotannossa, jalostettuna liikennekaasuna ja teollisuuden prosessien raaka-aineena. Syntynyt biokaasu voidaan myös nesteyttää (LBG, Liquefied biogas) samalla tavalla kuin maakaasu voidaan nesteyttää (LNG,

Liquefied natural gas). (Mutikainen et al., 2016; Winquist et al., 2015). Bioreaktorista syntyvät orgaaniset sivutuotteet (mädäte) voidaan käyttää hyödyksi lannoitteena.

Synteettistä biokaasua (SBG, Synthetic biogas) voidaan valmistaa termokemiallisesti puusta tai muusta biomassasta. Myös syntynyt SBG pitää vielä jalostaa, jotta se soveltuu ajoneuvopolttoaineeksi. SBG jalostetaan samoilla menetelmillä, joita maakaasun ja biokaasun jalostuksessa käytetään. (Mutikainen et al., 2016; Kymäläinen and Pakarinen, 2015).

Kuvassa 1 on esitetty biokaasuliiketoiminnan kokonaiskuva, joka rakentuu aina raaka-aineesta energian käyttöön (Mutikainen et al., 2016).



Kuva 1. Biokaasuliiketoiminnan kokonaiskuva (Mutikainen et al., 2016).

Tässä tutkimuksessa tarkastellaan, miten mädättämällä tuotetaan biokaasua, kun prosessin raaka-aineina käytetään teurastusjätteitä, jätevedenpuhdistamon lietettä tai kasvibiomassaa.

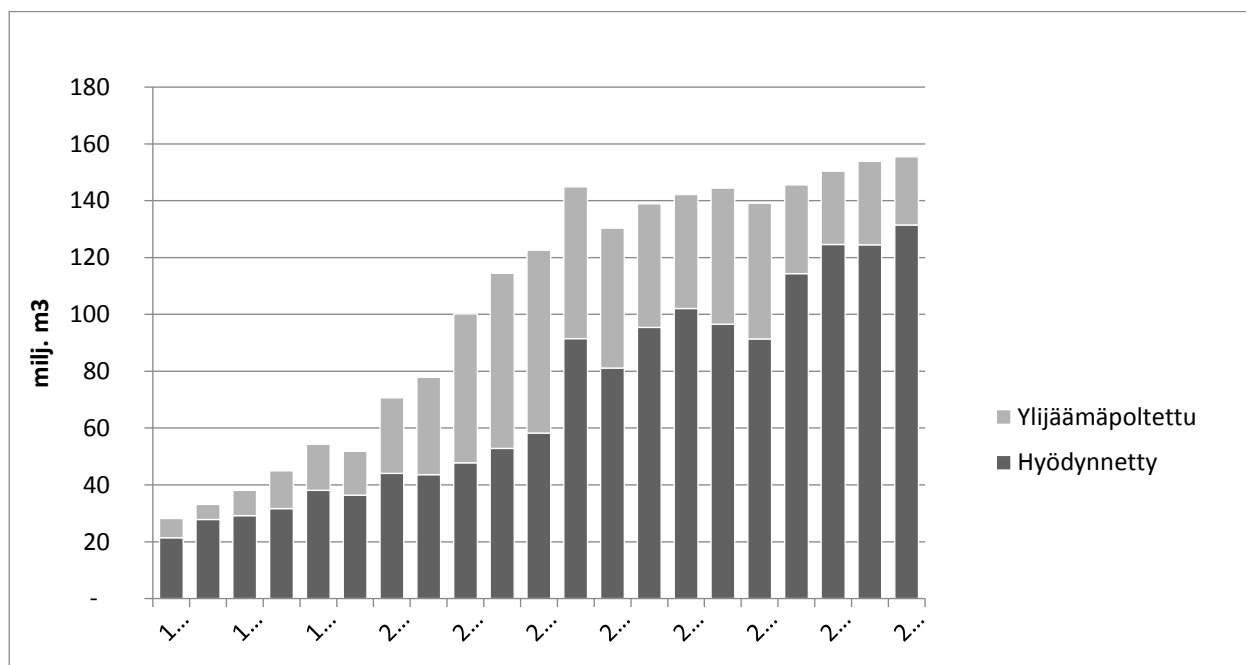
2.1 Biokaasun tuotantomäärät Suomessa

Suomen teoreettista biokaasupotentiaalia on selvitetty useissa eri raporteissa (Lampinen 2003; Asplund et al., 2005; Tähti and Rintala, 2010). Laskelmien mukaan biokaasun (metaani) teoreettinen energiapotentiaali vaihtelee 14–95 TWh välillä (Lampinen 2003; Asplund et al., 2005; Tähti and Rintala, 2010). Eri selvityksissä on jonkin verran eroja raaka-ainemäärien ja metaanipotentiaalın lähtöarvoissa. Tähti ja Rintala (2010) tutkimuksessaan päätyivät siihen, että Suomessa teoreettinen tuotantopotentiaali on 24,4 TWh. Tämä arvio perustuu siihen, että Suomessa muodostuu vuosittain

6,5–12,1 milj. t kuiva-ainetta eli Total Solids (TS), joka soveltuu erilaisiin biokaasuprosesseihin - eli biokaasuprosesseihin soveltuvia biomassoja, kuten lantoja, kasvimassaa, biojätteitä ja jätevedenpuhdistuksen lietteitä.

Tähti ja Rintala (2010) arvioivat jokaiselle materiaaliyhteisölle hyödynnettävissä olevat potentiaalit eli ns. teknistaloudellisen potentiaalin. Teknistaloudellinen energiapotentiaali on n. 9,2 TWh (5,1–13,9 TWh) vuodessa. Teknistaloudellinen potentiaali tarkoittaa sitä, että kaikkea materiaalia ei käytännössä voida hyödyntää, eikä sen hyödyntäminen ole aina ympäristöllisesti eikä taloudellisesti kannattavaakaan. Suurin energiapotentiaali on maataloudessa, erityisesti peltobiomassoissa (teoreettinen 17,8 TWh, teknistaloudellinen 5,8 TWh) ja myös lannoissa (teoreettinen 3,5 TWh, teknistaloudellinen 1,4 TWh). (Tähti and Rintala, 2010).

Vuonna 2014 biokaasua tuotettiin yhteensä 155,5 miljoonaa kuutiota. Tästä tuotettiin lämpöä 454,7 GWh/v ja sähköä 158,6 GWh/v, mikä vastaa noin 0,5 prosenttia Suomen uusiutuvan energian tuotannosta. Biokaasua ylijäämänä poltettiin 101,0 GWh/v. (Kaasuyhdistys). Biokaasulla tuotettu energiamäärä (613,3 GWh/v) on noin puoli prosenttia Suomessa tuotetusta uusiutuvan energian tuotannosta (Tilastokeskus, 2014 energiatilasto). Kuvassa 2 on esitetty biokaasun tuotantovolyymit ja niiden hyödyntäminen vuosina 1994-2014 (Kaasuyhdistys).



Kuva 2. Suomessa tuotettu biokaasu ja sen hyödyntäminen (1994-2014) (Kaasuyhdistys).

Suomessa biokaasun tuotanto ja hyödyntäminen on kasvanut vuosittain vain muutamalla prosentilla. Biokaasua tuotetaan eniten kaatopaikkojen yhteyteen rakennetuilla kaasulaitoksilla, toiseksi eniten

yhteismädätyslaitoksilla ja kolmanneksi eniten biokaasua tuotetaan yhdyskuntajäteveden puhdistamoilla (Kaasuyhdistys).

2.2 Biokaasun raaka-ainesyötteen ja niiden potentiaali

Biokaasulaitoksen syötteinä voidaan käyttää biohajoavia orgaanisia raaka-aineita; jätevedenpuhdistamolietettä, erilliskerättyjä biojätteitä, eräitä prosessiteollisuuden jätteitä, maatalousjätteitä ja tiettyjä kasvi- ja eläinbiomassoja (Nevalainen 2011; Erjava 2009).

Tällä hetkellä Suomessa yleisimpiä raaka-aineita biokaasun tuotannossa ovat maatalouden, teollisuuden ja yhdyskuntien sivutuotteet ja jätteet (Kymäläinen and Pakarinen, 2015).

2.2.1 Eläinperäiset raaka-aineet biokaasun tuotannossa

Eläinperäiset raaka-aineet voidaan jakaa kolmeen luokkaan sen perusteella, miten raaka-aineita saa käsitellä ja mihin prosessissa syntynyttä sivutuotetta saa käyttää. Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EU) N:o 1069/2009 ja sen täytäntöönpanosta annettu komission asetus ((EU) N:o 142/2011) sisältävät sivutuotteita koskevia säännöksiä (Maa- ja metsätalousministeriö). Ensimmäinen luokka sisältää ne eläinperäiset tuotteet, joille on annettu kiellettyjä aineita, kuten hormoneja tai beetasalpaajia, yli lainsäädännöllisen rajan. Myös ruhot ja muut eläinperäiset jätteet, jotka sisältävät TSE-tauteja kuuluvat luokkaan yksi. Luokan yksi sivutuotteita voidaan käsitellä vain käsittely- ja polttolaitoksissa. (Lehtomäki et al., 2007; Nevalainen 2011)

Luokkaan kaksi kuuluvat ne elintarvikealan sivutuotteet, jotka sisältävät sallittuja lääke- ja vierasaineita yli lainsäädännössä sallitun rajan. Näitä lääkeaineita ovat antibiootit ja muut eläimille suunnatut lääkeaineet, mikäli niitä ei luokitella kuuluvaksi luokan yksi aineiksi. Osaa tämän luokan sivutuotteista voidaan käyttää sellaisenaan biokaasun valmistuksessa. Tällaisia sivutuotteita ovat eläinten lanta ja niiden ruuansulatuskanavien sisältö. Muut luokan kaksi sivutuotteet ovat hygienisoitava ensin, jonka jälkeen niitä voidaan käyttää biokaasun valmistuksessa. (Lehtomäki et al., 2007; Nevalainen 2011). Raaka-aineet, jotka sisältävät antibiootteja, raskasmetalleja ja joitain orgaanisia happoja, voivat vahingoittaa mädätysreaktioita tai jopa tappaa mikro-organismien (Mikkonen and Kauriinoja, 2011).

Luokkaan kolme kuuluvat kaikki ihmisravinnoksi hyväksytyistä eläimistä saatavat sivutuotteet, joita ei ole kaupallisista syistä tarkoitettu ihmisravinnoksi (esim. mahat ja keuhkot). Luokan kolme sivutuotteet voidaan käyttää raaka-aineena biokaasun valmistuksessa sivutuoteasetusten mukaisessa laitoksessa. Luokan kolme sivutuotteita voidaan myös käyttää lemmikkieläinten ja muiden eläinten rehujen valmistuksessa. (Lehtomäki et al., 2007; Nevalainen 2011)

Luokan 1 sivutuotteita ei ole sallittua käyttää biokaasulaitosten raaka-aineena, luokan 2 sivutuotteet on ennen käyttöä sterilisoitava ja luokan 3 sivutuotteet hygienisoitava. Poikkeuksellisesti luokassa 2 lanta voidaan käyttää raaka-aineena ilman sterilisointia ja hygienisointia, mikäli asetuksessa lopputuotteen laatuvaatimukset täyttyvät. (Lehtomäki et al., 2007). Biokaasun tuotannossa voidaan siis käyttää eläinperäisiä sivutuotteita, joilla on luokitus kaksi tai kolme. Sivutuoteasetuksen ulkopuolelle jäävät kokonaan leipomotuotteet (jäteleipä, kakut, leivonnaiset, keksit), pasta, suklaa, makeiset ja niiden samankaltaiset tuotteet, hedelmät sekä vihannekset (Taavitsainen 2006). Metaanintuottopotentialiaali vaihtelee merkittävästi eläinperäisten sivutuotteiden välillä (taulukko 1).

Taulukko 1. Elintarviketeollisuuden eläinperäisten sivutuotteiden metaanintuottopotentialiaaleja (Tähti and Rintala, 2010).

Elintarviketeollisuuden eläinperäiset sivutuotteet	Keskiarvo $\frac{m^3_{CH_4}}{t_{VS}}$	Vaihteluväli $\frac{m^3_{CH_4}}{t_{VS}}$
Nautaeläimen lanta	175	100-250
Sian lanta	350	300-400
Siipikarjan lanta	250	200-300
Lampaan lanta	100	88-113
Hevosien lanta	150	120-180
Teurastamojätteet	570	200-910
Elintarviketeollisuuden lietteet ja jätevedet	400	300-500

2.2.2 Jätevedenpuhdistamon liete

Jätevedenpuhdistuksessa syntyy sekä jätevedettä että lietettä (orgaanista kiintoainetta). Tätä kiintoainetta voidaan erottaa vedestä mekaanisesti, kemiallisesti tai biologisesti. Syntyvän lietteen koostumus on hieman erilaista erotustavasta riippuen. Lietteiksi luokitellaan yhdyskuntien puhdistamolietteiden lisäksi kiinteistöjen sakokaivolietteet ja teollisuuden lietteet. Suomessa syntyy lietettä noin 160 000 kuiva-ainetonna vuodessa. Liete sisältää jonkin verran orgaanista ainetta, fosforia (P), typpeä (N) sekä hivenaineita, mutta kaliumin (K) määrä on vähäinen. Lisäksi raskasmetallimäärät vaihtelevat riippuen yhdyskunnan ja pienteollisuuden jätevesien laadusta. (Lohiniva et al., 2001; Rantanen et al., 2008).

Liete vaatii mädätyksen tai kompostoinnin, jotta taudinaiheuttajien määrää, hajuhaittoja sekä lietteen käytöstä aiheuttamia terveys- ja ympäristöhaittoja voidaan merkittävästi vähentää.

Puhdistamolietteiden biokaasutus on yleinen lietteenkäsittelytekniikka suurissa ja keskisuurissa jätevedenpuhdistamoissa. Biokaasutus on esim. kompostointilaitosta edullisempi tekniikka edellyttäen, että ylijäämäenergia saadaan hyötykäyttöön. Lietteiden tuhkapitoisuus (>50 %) ja laatu muuttuvat biokaasutuksessa, kun esim. raskasmetalleja konsentroiduu hydrolyysijäännökseen. Tästä johtuen mädätetyn lietteen kompostointi voi olla ongelmallista. Mädätettäessä puhdistamolietteitä, tavallisesti sen orgaanisesta aineksesta 40 % muuttuu kaasuksi, 10 % liukenee veteen ja 50 % jää lietteeseen. Kuiva-ainepitoisuus alenee 30-40 %. (Lohiniva et al., 2001)

Mädätetyn lietteen poltossa lietteen lämpöarvo laskee mädätyksen 17,5 MJ/kg:sta polton noin 10,5 MJ/kg:een. Tästä johtuen sitä ei pidetä kovin taloudellisena jatkoprosessina. Mädätys soveltuu usein erityisen hyvin puhdistamoille, joissa mädätysjäännös sijoitetaan kaatopaikalle. (Lohiniva et al., 2001)

Teknisiltä vaatimuksiltaan puhdistamolietteiden käsittely nostaa laitosinvestointia verrattaessa puhtaiden syötteiden käsittelyyn. Pellolle levitettävä käsitelty puhdistamoliete on hygienisoitava ennen tai jälkeen mädätyksen. (Latvala 2009; Seppälä et al., 2009)

Biokaasureaktoriin voidaan syöttää eri lietejakeet yhdisteenä. Tämä tehdään kuitenkin niin, että lietteen kuiva-ainepitoisuutta on nostettava ennen sen syöttämistä biokaasureaktoriin, koska kaikkien käsittelytapojen jälkeen liete on hyvin vesipitoista. Sen kuiva-ainepitoisuus eli TS-pitoisuus on vain 1%. Kuiva-ainepitoisuuden nostamiseksi lietettä voidaan käsitellä mekaanisesti lingolla, rumputiivistimellä tai ruuviKuivaimella. Mekaanisen käsittelyn jälkeen lietteen TS-pitoisuus nousee yleensä 10-15%. (Lohiniva et al., 2001).

Syöttölietteen koostumus on hyvin monimuotoista, sillä se sisältää eri lietteitä vaihtelevia määriä. Tästä johtuen jätevedenpuhdistamoiden lietteiden metaanintuotto vaihtelee $160-400l\left(\frac{kg}{VS}\right)$, jossa VS on orgaanisen aineen osuus lietteestä. VS:n arvo perustuu syöttölietteessä olevan esiselkeytyslietteen ja biolietteiden välisestä suhteesta. Jätevedenpuhdistamon liete soveltuukin hyvin biokaasun tuotantoon sen käsiteltävyyden ja hyvän metaanintuotannon takia. Mädätysjätteen loppusijoitus on tuotantoprosessin haasteellisin vaihe, sillä jätteelle on asetettu tiukkoja laatu- ja hygienisointivaatimuksia. (Kymäläinen and Pakarinen, 2015).

Tähti ja Rintala (2010) arvioivat, että mikäli yhdyskuntien jätevedet voitaisiin hyödyntää suoraan anaerobitekniikoilla, saataisiin niistä metaania n. 73,5 milj. m³. Tämä vastaa primaarienergiana n. 740 GWh.

2.2.3 Kasvibiomassa

Biokaasun tuotannossa voidaan hyödyntää myös energiakasveja. Näitä energiakasveja voidaan tuottaa tarkoituksellisesti biolaitosten käyttöön tai voidaan saada kasvituotannosta sivutuotteena tai jätteenä. Energiakasveja voidaan tuottaa suuria määriä vähällä tuotantopanoksella. Suomessa potentiaalisin energiakasvi on nurmi, jota tuotetaan suuria määriä rehuntuotantoon. Nurmea tuotetaan myös enemmän kuin on tarvetta, jolloin muodostuu rehuntuotannon ylijäämää ja hävikkiä. Nurmea on mahdollista saada hoitotoimin myös sivutuotteena viljelemättömiltä pelloilta ja kesannoilta. (Seppälä et al., 2014).

Nurmen lisäksi energiakasviksi voidaan hyödyntää viljanviljelyssä muodostunutta olkea. Sitä hyödynnetään nykyisin ainoastaan kuivikkeena tai se kynnetään takaisin peltomaahan. Oljen potentiaali biokaasuntuotannossa olisi suuri, sillä sen orgaanisen aineksen osuus on 92% ja kuiva-ainepitoisuus jopa 86-90%. Ominaisuuksien takia olki olisi oiva lisä biokaasun tuotannossa. (Kaparaju et al., 2002; Lehtomäki 2006; Lehtomäki et al., 2008; Seppälä et al., 2009; Weiland 2003). Eri kasvibiomassojen metaanintuotto potentiaalit on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Metaanintuotto potentiaalit kasvibiomassoille (Kymäläinen and Pakarinen, 2015).

Kasvibiomassan lähde	$[\frac{m^3_{CH_4}}{t_{VS}}]$	$[\frac{m^3_{CH_4}}{t_{tp}}]$
Olki	240-320	199-260
Nurmi	213-401	72-104
Ruokohelpi (tuore)	253-351	47-116
Maissi	312-410	-
Sokerijuurikkaan naatit	340	34

Kasvibiomassojen metaanintuotto on hyvin korkea verrattuna eläinperäisissä sivutuotteissa oleviin lantoihin. Tämä johtuu siitä, että kasvibiomassat sisältävät enemmän orgaanisia aineksia. (Kymäläinen and Pakarinen, 2015).

2.3 Mädättämällä valmistetun biokaasun tuotantoprosessi

2.3.1 Erilaiset prosessit ja niihin liittyvät laitokset

Biokaasuprosessit voivat olla joko panos- tai jatkuvatoimisia, yksi- tai monivaiheisia. Biokaasuprosessit voidaan luokitella myös lämpötila-alueen mukaisesti mesofiiliseksi, termofiiliseksi ja psykrofiiliseksi prosesseiksi. Biokaasun tuotannossa käytetään erilaisia mikrobeja ja lämpötiloja optimoimaan kunkin prosessin kulkua. Luonnonoloissa anaerobinen hajotusprosessi

toimii 10 - 100 °C lämpötila-alueilla. Korkeammissa lämpötiloissa reaktiot ovat nopeampia kuin matalissa, mutta prosessin toteuttaminen vaatii enemmän energiaa. (Hatsala 2004, pp. 4 – 8.)

Mesofiiliset ja termofiiliset prosessit ovat lämpötilaan pohjautuvia tuotantoprosesseja. Mesofiiliset prosessit toimivat lämpötilavälillä 35-38 °C:ta. Tuotannon tapahtuessa näissä lämpötiloissa, syötteen sisältämät taudinaiheuttajat eivät eliminoidu, jolloin prosessissa syntyvä mädätysjäte on hygienisoitava. Termofiiliset prosessit toimivat korkeimmilla lämpötiloilla, 50 - 67 °C (optimaalisin lämpötila biokaasun tuotannolle on 55 °C). Korkeammassa lämpötilassa orgaaninen aine hajoaa nopeammin, mikä pienentää tarvittavan reaktorin tilavuutta. Tällöin myös metaanintuotto on korkeampaa ja mädätysjäte hygienisoituu lämpötilan vaikutuksesta. Lämpötilan lisäksi tärkeitä biokaasuprosessin olosuhdetekijöitä ovat happamuus, kiintoainepitoisuus, hiili/typpi-suhde ja inhibitio. Optimaalinen pH-alue on noin 6-8, vaikkakin mikrobien on havaittu pystyvän hajottamaan hiilihydraatteja pH:n ollessa välillä 5-9. Anaerobisen hajoamisen viimeinen vaihe, metaanin muodostumisvaihe on kaikkein herkin pH:n muutoksille. Raaka-aineiden kuiva-ainepitoisuus (TS-%) vaikuttaa suuresti koko biokaasulaitoksen esim. rakennuskokoon ja reaktorityyppiin. Kiintoainepitoisuuksien mukaan biokaasuprosessi voidaan jakaa märkä- ja kuivaprosesseihin. (Zeeman et al., 1985; Machie and Bryant, 1995; Hatsala 2004)

Psykrofiilisessä prosessissa lämpötila pyritään pitämään alle 20 °C:ssa. Koska prosessissa käyttölämpötila on alhainen, mikrobien toiminta on melko hidasta. Tämä johtaa pitkiin käsittelyaikoihin ja myös suurempiin reaktoreihin, mikä johtaa siihen, että laitoksen kustannukset nousevat. (Lehtomäki et al., 2007, pp. 31–32).

Perinteisesti biokaasuteknologia perustuu märkäprosessiin, jolloin syötteiden TS-% on yleisin alle 13 % ja käsittely tapahtuu jatkuvasekoitteisissa reaktoreissa. Märkäprosessien syötteen ja mädätysjäännökset ovat siten helposti pumpattavissa ja mekaanisesti sekoitettavissa. Kiinteiden materiaalien, kuten kasvibiomassojen siirtelyä voidaan helpottaa esim. ruuvikuljettimien avulla. (Wellinger 1999; Lehtomäki et al., 2007, pp. 32-33)

Toinen, uudempi tekniikka perustuu kuivaprosessiin, jolloin käsiteltävän materiaalin TS-% on yleensä 20 – 40 % ja kaasuntuotto reaktoritilavuutta kohti on korkeampi kuin märkämädätyksessä. Muita kuivaprosessin etuja verrattuna märkäprosessiin ovat mm. syötteiden vähäisempi lämmityksen tarve, yhä vähäisemmät hajuhaitat, (Schäfer et al., 2006) ja huomattavasti vähäisempi mädätteen syntyminen. Kuivaprosessin haittapuolia ovat puolestaan mm. syötteiden pitempi viipymäaika reaktorissa ja kalliimpien laitteiden tarve materiaalien syötössä reaktoriin. Lisäksi kuivaprosesseissa panosreaktorien materiaalien syöttö ja tyhjennys ovat työlästä (Schäfer et al., 2006), joten tästä

päätellen esim. maatilakohtaiset olosuhteet voisivat suosia kuivaprosessiteknologiaa, koska raaka-aineiden siirtelyyn soveltuvat esim. tilan oma kuormaaja tai etukuormaajatraktori (Lehtomäki et al., 2007). Biokaasureaktorin hiili/typpi- eli C/N-suhteen optimaalinen arvo on 20–30, jolloin bakteerit saavat ravinteita oikeassa suhteessa. Mikäli C/N-suhde on liian suuri, metaanintuottajabakteerit kuluttavat liikaa typpeä, josta seuraa kaasuntuoton aleneminen. Liian matala C/N-suhde puolestaan vapauttaa typpeä muodostaen ammoniakkaa, joka taas nostaa pH:ta. Ammoniakki on yksi inhibiitori eli hajoamista hidastava tekijä liian suurina määrinä, joka ilmenee erityisesti maatalouden jätteitä käsiteltäessä. Muita inhibioivia aineita ovat mm. suolat, raskasmetallit, klooratut hiilivedyt, antibiootit, pestisidit ja desinfiointiaineet (Hatsala 2004; Weiland 2006).

Jatkuvatoimiset prosessit ja panosprosessit perustuvat materiaalin syöttämiseen. Jatkuvatoimisissa prosesseissa reaktoriin pumpataan tasaisesti materiaalia, jotta sen tilavuus pysyisi keskimäärin samana. Tämän prosessityypin etuna on sen automatisointi ja metaanin tasainen tuotto. Panosproesseissa reaktori tyhjenetään ja täytetään säännöllisin väliajoin, mutta myös käsiteltyä materiaalia syötetään takaisin reaktoriin, jotta mikrobikanta pysyisi tasaisena. Kaasuntuoton tasaisuuden ylläpitämiseksi on käytettävä useampaa panosprosessia rinnakkain. (Weiland 2006; Kymäläinen and Pakarinen, 2015)

Monivaiheisissa prosesseissa otetaan huomioon anaerobisissa olosuhteissa olevien mikrobien toiminnan parantaminen. Prosessi voidaan jakaa useaan eri osaan, jossa pyritään optimoimaan mikrobien toimintaa hajoamisen edetessä. Näin taataan mikrobeille eri hajoamisvaiheessa hyvä toimintaympäristö. Monivaiheisessa prosessissa pidennetään syötteen viipymäaika, jonka avulla vähennetään anaerobisen hajoamisen erottelua eri prosessin osiin. Näin voidaan eliminoida riskejä, kuten syötteen virtaaminen ulos ennen reaktoria. Monivaiheiset prosessit ovat kalliimpia rakentaa ja ylläpitää, mutta ovat hyvin toimintavarmoja verrattuna yksitoimisiin prosesseihin. (Weiland, 2006; Vertès et al., 2010; Kymäläinen and Pakarinen, 2015).

2.3.2 Mädätysprosessin sivutuotteet

Biokaasun valmistuksessa muodostuu ravintorikasta mädätysjäännöstä, jota voidaan käyttää lannoitteena maataloudessa tai teollisuudessa. Mädätysjäännöksen hyvä soveltuvuus kasviravinteena perustuu sen kuiva-aineen ja orgaanisen aineen osuuden pienenemiseen verrattuna syötteeseen. Syötteestä hajoaa orgaanisia aineksia ja kuiva-aineksia biokaasun valmistusprosessin aikana, jolloin mädätysjäännös on juoksevampaa kuin prosessisyöte. Mädätysjäännös myös sisältää siinä syötteen mukana tulleita ravinteita, kuten typen, fosforin, kaliumin ja magnesiumin. (Nevalainen 2011; Kymäläinen and Pakarinen, 2015)

Mädätysjäännösten hyödyntämisessä on tärkeää erotella kuiva- ja märkäjakeet toisistaan. Erotusmenetelminä voidaan käyttää: erotettavien komponenttien ominaispainoeroihin perustuvat menetelmät, joita ovat lasketus ja linkous. Partikkelien kokoon perustuvat menetelmät, seulonta, kalvotekniikat ja ruuvikuivain. Mädätysjätteen terminen käsittely tapahtuu haihdutuksella tai kuivauksella. Erotusprosessien päätarkoituksena on pystyä jakamaan mädätysjäännös kuivaan jakeeseen ja märkäjakeeseen. Kuivajae sisältää enemmistön mädätysjäännöksen fosforista ja märkäjake tyypeä. (Nevalainen 2011; Kymäläinen and Pakarinen, 2015).

Käsitellystä mädätysjäännöksestä syntyvää lopputuotetta voidaan käyttää joko nestemäisenä tai kiinteänä viljelysmaan lisäravinteena. Eri syötekoostumuksista syntyneitä mädätysjäännöksiä käytetään hieman erilaisiin tarkoituksiin. Kasvi- ja eläinperäisestä syötteestä syntyviä mädätysjäännöksiä käytetään pääsääntöisesti vihannesten sekä vilja- ja nurmikasvien lannoittamiseen. Ihmisperäistä mädätysjäännöstä voidaan hyödyntää viljakasveille, ja nurmikasveille sen perustamisvaiheessa. Puhdistamolietteet voidaan hyödyntää maanparannusmateriaalina tai tuorekompostina viherrakentamisessa. (Erjava 2009).

2.4 Biokaasun käsittely ja hyödyntäminen

Metaanin käyttö ajoneuvojen polttoaineena sisältää monia hyötyjä: muihin polttoaineisiin verrattuna sen hinta on hyvin kilpailukykyinen ja hiilijalanjälki on pieni (Biokaasuauto, Biokaasun edut).

2.4.1 Biokaasun koostumus

Biokaasua voidaan jalostaa keräämällä biometaanina bioreaktoreista tai raakakaasuna kaatopaikoilta. Kaasun koostumuksissa on eroja, kun tarkastellaan reaktorista tai kaatopaikalta peräisin olevia kaasuja (taulukko 3).

Taulukko 3*). Raakakaasun eroavuudet (Deublein and Steinhäuser, 2008; Wellinger et al., 2013).

Komponentti	Raakakaasu reaktorista	Raaka kaatopaikkakaasu	Jalostettu biokaasu
Metaani (CH_4) til-%	45-75	20-60	95-99
Hiilidioksidi (CO_2) til-%	20-55	25-50	1-5
Typpi (N_2) til-%	0-2	4-35	0-4
Happi (O_2) til-%	0-1	0,5-5	< 1

*) Taulukossa esitetyt arvot ovat Ruotsin liikenteessä käytettävän standardin mukaisia

Suurimpina eroina ovat metaanin (CH_4), hiilidioksidin (CO_2), typen (N_2) ja hapen (O_2) osuudet. Myös rikin (S), vedyn (H_2) ja niiden yhdisteiden osuuksissa on eroja, mutta ne jätetään huomioimatta tässä työssä, sillä liikenne käyttöön jalostettu biokaasu ei sisällä näitä komponentteja. (Deublein and Steihauser, 2008; Wellinger et al., 2013)

Biokaasu sisältää tyypillisesti 65 % metaania ja 35 % hiilidioksidia. Jotta biokaasua voitaisiin käyttää ajoneuvojen polttoaineena tai johtaa se maakaasuverkkoon, sen suhteellista metaanipitoisuutta tulee nostaa ja hiilidioksidia poistaa niin paljon kuin mahdollista. (Kylmänen and Pakarinen, 2015). Tärkeimmät vaiheet biokaasun jalostuksessa ovat hiilidioksidin, veden ja rikin erotus. Tällöin seoksen metaanipitoisuus saadaan nostettua noin 95 %:n tasolle (Biokaasuauto, Biokaasun jalostus biometaaniksi).

Metaanin suurimpia eroja verrattuna bensiiniin ja dieselöljyyn ovat sen energiasisältö eli tehollinen lämpöarvo ja oktaaniluku. Metaanin tehollinen lämpöarvo on noin 50 MJ/kg, kun bensiinin ja dieselöljyn vastaava arvo on 41-43 MJ/kg. Oktaaniluvussa on suuria eroja, kun puhutaan metaanin ja perinteisten polttoaineiden välisistä eroista. Metaanin oktaaniluku on 138 ja vastaavasti bensiinin on 95-99. Korkeammalla oktaaniluvulla on vaikutusta moottorin tehoon ja hyötysuhteeseen. Biokaasua voidaan hyödyntää erittäin laajalti liikennekäytössä, ja se soveltuukin kaikkiin liikenteessä käytettäviin ajoneuvoihin. (Kymäläinen and Pakarinen, 2016).

2.4.2 Biokaasun jalostus

Biokaasun jalostukseen ja puhdistukseen vaikuttaa ensisijaisesti kaasun talteenottolähde, eli mistä raakakaasut otetaan talteen. Eri raakakaasujen välillä on koostumuksellisia eroja, kun tarkastellaan niiden pääkomponenttien osuuksia. Maakaasun koostumuksessa on yleisellä tasolla enemmän vaihtelua kuin raakabiokaasussa. Tämä edellyttää sitä, että raakamaakaasua on näin puhdistettava ja jalostettava biokaasua enemmän. Liikenteen polttoaineeksi suunnitellun bio- ja maakaasun täytyy sisältää 95% metaania. Sähköntuotannossa metaanipitoisuudeksi voi riittää 20%. Kaatopaikkakaasun metaanipitoisuus vaihtelee 20-55%, ja sitä voidaan käyttää parhaimmissa kaatopaikkakaasumootoreissa (stirling-moottorit) (Lampinen 2002).

Kryojalostus oli ensimmäisiä jalostusteknologioita ja se otettiin käyttöön vuonna 1920. Tämä jalostusteknologia oli kehitetty maakaasun jalostamista varten, ja jalostus perustuu komponenttien kiehumispisteiden ja sulamispisteiden välisiin eroihin. Kymmenen vuotta myöhemmin vesipesu otettiin käyttöön biokaasun jalostamisessa. Vesipesu on tehokas hiilidioksidin ja rikkivedyn puhdistaja, kun taas kryojalostus soveltuu hyvin typen poistoon.

Vesipesussa raakabiokaasu johdetaan ensin kompressoriin, jossa se paineistetaan 6-10 bar:iin. Kaasun paineistuksella on vaikutusta pesuprosessissa tarvittavan absorptiotornin korkeuteen. Mitä korkeampaan paineeseen kaasu paineistetaan, sitä korkeampi absorptiokolonnin tulee olla. Paineistuksen jälkeen kaasu syötetään absorptiotorniin sen pohjan kautta, jolloin kaasu virtaa vapaasti ylöspäin. Absorptiokolonnin huipulta johdetaan vettä sen sisälle, jolloin vesi on vapaasti kontaktissa ylös virtaavan kaasun kanssa. Tässä vaiheessa kaasun sisältämä hiilidioksidi liukenee veteen ja vesi poistuu tornin pohjan kautta paisuntahöyrystimeen. Samanaikaisesti jalostettu kaasu poistuu absorptiokolonnin huipulta. Tämän jälkeen kaasu kuivataan. Jalostetun biokaasun metaanipitoisuus voi olla jopa 97%.

Vesipesussa hiilidioksidin lisäksi veteen liukenee myös rikkivetyä ja jonkin verran metaania. Veteen liunneen metaanin määrä on tavallisesti 4-6% koko biokaasun metaanin määrästä. Kun vesi on johdettu paisuntahöyrystimeen, alennetaan paisuntahöyrystimen painetta nopeasti, jonka seurauksena veteen liunnut metaani poistuu osittain vedestä. Metaani johdetaan paisuntahöyrystimestä takaisin syötteeseen.

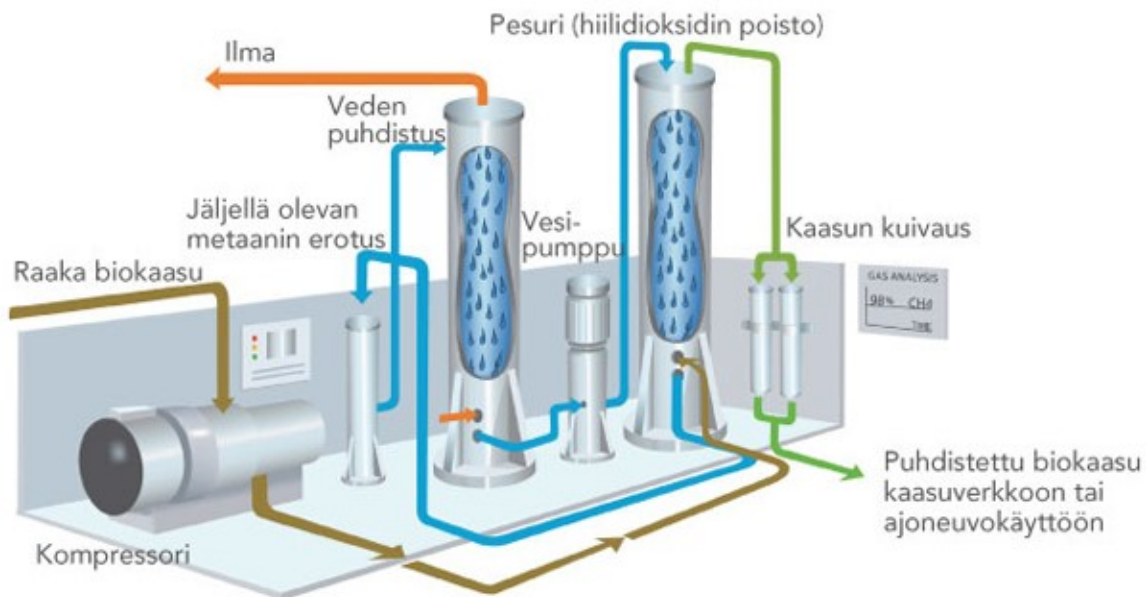
Vedestä on poistunut metaani, mutta se sisältää vielä yhdisteitä, jotka täytyy poistaa siitä. Vesi johdetaan paisuntahöyrystimestä desorptiokolonniin, jossa se on kontaktissa ilman kanssa. Vesi johdetaan desorptiokolonnin huipulle, josta se laskeutuu alaspäin ja tornin pohjalle johdettu ilma virtaa ylös kolonnissa. Ilmaan sitoutuu hiilidioksidia ja muita epäpuhtauksia vedestä, joka poistuu tornin huipulta. Mikäli poistoilmassa on paljon epäpuhtauksia, kuten rikkivetyä, on se käsiteltävä ennen kuin se voidaan vapauttaa ilmakehään. Puhdistettu vesi johdetaan takaisin absorptiotorniin kaasun puhdistusta varten. Mikäli vedessä on vielä epäpuhtauksia puhdistuksen jälkeen, voidaan osa vedestä korvata uudella.

Puhdistuksissa käytettävät absorptio- ja desorptiokolonnit ovat täytekappalekolonneja. Täytekappaleiden tarkoituksena on kasvattaa aineensiirron kontaktipinta-alaa. Kolonnin sisällä täytekappaleet ovat kaasua läpäisevien tukilevyjen päällä, ja näiden yläpuolella on pitolevy. Pitolevy ei läpäise kaasua ja sen tarkoituksena on jakaa kolonnin huipulta valuvaa nestettä tasaisemmin koko kolonnin poikkipinta-alan mukaisesti. Näin saavutetaan koko kolonnin laajuinen kontakti kaasun ja nesteen välillä.

Täytekappaleita on erilaisia ja niiden ominaisuudet poikkeavat hieman toisistaan. Metalliset täytekappaleet ovat yleisesti suosittuja, sillä niiden kestävyys ja kostuvuus ovat hyviä, mutta ne ovat muita täytekappaleita kalliimpia. Keraamiset täytekappaleet ovat hieman heikompia kuin metalliset, mutta niiden kostuvuus on parempi ja ne ovat halvempia. Keraamisia täytekappaleita käytetään

korrodoivien aineiden kanssa ja korkeissa lämpötiloissa. Muoviset tätekappaleet ovat kaikkein halvimpia ja niiden kestävyys on kohtalaista. Näitä tätekappaleita on käytettävä suurien nestevirtauksien kanssa, sillä niiden kostuvuus on heikkoa pienillä virtauksilla. Kuvassa 3 on esitetty biokaasun puhdistus vesipesumenetelmällä (Sarlin).

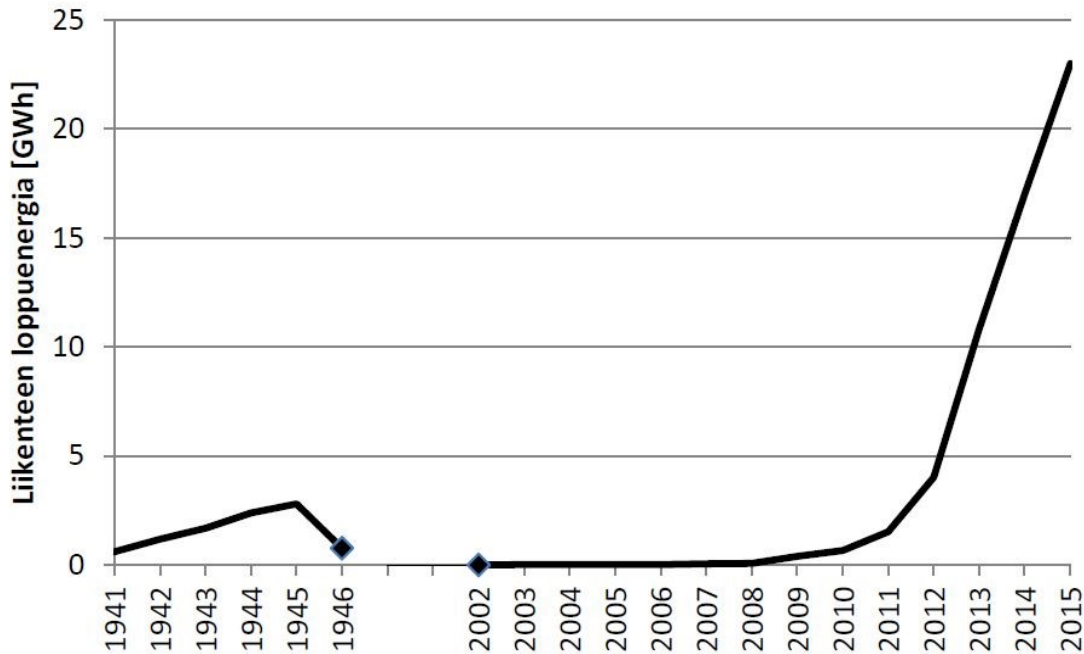
Greenlane Biogas -biokaasun jalostuslaitos / toimintaperiaate



Kuva 3. Biokaasun puhdistus vesipesumenetelmällä (Sarlin).

3 Biokaasu liikenteen polttoaineena

Biokaasun liikennekäyttö alkoi Suomessa jo vuonna 1940 ja viime vuosina biokaasun liikennekäyttö on kasvanut melko voimakkaasti (kuva 4).



Kuva 4. Biokaasun liikennekäyttö Suomessa 1941 - 2015 (Lampinen 2016).

Vuonna 2015 biokaasun kulutus oli 23 GWh ja sen käyttö kasvoi 35 % edellisvuoteen verrattuna (Lampinen 2016). Tällä hetkellä kaikki Suomessa kulutettu liikennebiokaasu on paineistettua 100 prosentin biokaasuna (CBG100, Compressed BioGas 100 %) (Lampinen 2016). Nesteytettyä biokaasua (LBG, Liquefied BioGas) teknologia on jo kehittynyt ja Suomessa on useita alkavia projekteja, joissa syntyvä biokaasu tullaan nesteyttämään. (Lampinen 2016)

Julkisten kaasuntankkausasemien määrä oli 26 kappaletta vuoden 2016 lopussa (Gasum). Vuoden 2016 aikana Gasum rakensi myös kaksi LNG tankkausasemaan Vuosaareen, Helsinkiin sekä Turkuun (Gasum). Lisäksi biokaasua tankataan Suomessa kahdelta yksityiseltä nopeatankkausasemalta sekä mobiili- ja kotitankkausasemilta. Tankkausasemien määrä tulee kasvamaan seuraavan 10 vuoden aikana Suomessa ja koko EU:ssa johtuen vaihtoehtoisten liikennepolttoaineiden infrastruktuuridirektiivistä (2014/94/EU). Se edellyttää koko EU:n kattavan metaanitankkausverkon rakentamista.

Liikennepolttoaineeksi jalostetun biokaasun tuotantokapasiteetti oli Suomessa vuoden 2015 lopussa 16 MWpa (pa = polttoaineteho) (Kylmäläinen and Pakarinen, 2015).

3.1 Biokaasun varastointi

Biokaasua on varastoitava tuotantolaitoksilla, sillä sitä syntyy jatkuvasti reaktoreissa. Tuotantolaitoksilla ylimääräistä biokaasua poltetaan soihduilla, näin varmistetaan, ettei synny metaanivuotoja huoltokatkosten aikana. Metaanin varastointiaika tarjoaa potentiaalisen ratkaisun

energian huoltovarmuusongelmaan, sillä se säilyy varastoituna matalapaineisena miljoonia vuosia. Varastointikapasiteetti metaanille on 1MWh-500TWh.

Ajoneuvoissa varastointipaine riippuu ajoneuvon koosta. Henkilöautoille varastointipaine on 200 bar ja raskaille ajoneuvoille 250 bar. Tieliikenteessä käytettäville ajoneuvoille varastointipaineet ovat standardoituja, mutta vesi-, raide- ja ilmaliikenteessä standardipainetta ei ole määritelty. Näissä ei-standardipaineen alaisissa liikennemuodoissa voidaan käyttää hyvin korkeita varastointipaineita, kuten 700 bar. Ajoneuvoissa voidaan myös käyttää biokaasun ja vedyn paineistettua seosta. Tätä seosta kutsutaan hytaaniksi, ja seoksen vety-biokaasu suhde on 1:5.

3.2 Biokaasun kuljetus

Suomessa tuotetusta biokaasusta toistaiseksi merkittävä osa siirretään asiakkaille ja tankkausasemille jakeluverkostoa pitkin tai johdettuna samaan siirtoverkostoon maakaasun kanssa. Putkiverkostoja pitkin kuljettamiseen liittyy useita tuottajia ja asiakkaita.

Suomen ensimmäinen biokaasun putkikuljetustekniikka perustui biokaasun syöttämiseen kaupunkikaasuverkostoon. Kaupunkikaasu oli kivihiiilestä tai muusta kiinteästä polttoaineesta valmistettua kaasumaista polttoainetta. Biokaasun syöttö kaupunkikaasuverkostoon aloitettiin Suomessa jo 1930-luvulla.

Putkikuljetuksen voi toteuttaa alueellisesti, jolloin jakeluverkostoon on kytketty useita biokaasun tuottajia, jalostajia ja asiakkaita. Nämä jakeluverkostot voivat ulottua tuotantolaitoksesta jopa yksityisille asiakkaille asti. Tämä mahdollistaa kotitankkausasemien ja muiden biokaasua käyttävien laitteiden kytkennän verkostoon. Paikallisten jakelualueiden biokaasun laatuvaatimukset määräytyvät verkostoon kytkettyjen laitteiden mukaan.

Mikäli kuljetusmatka on pitkä, voidaan biokaasua syöttää maakaasun siirtoverkostoon. Tällöin biokaasu sekoittuu maakaasun joukkoon, ja siksi on varmistettava, ettei puhdistettu biokaasu laske maakaasun teknisiä ominaisuuksia. Siirtoverkostoon syötetyn biokaasun on täytettävä putkistossa virtaavalle maakaasulle asetetut minimivaatimukset, koska kaasuseoksen on täytettävä verkostoon kytkettyjen laitteiden asettamat vaatimukset. Suomessa biokaasu on jalostettua, ennen sen syöttämistä siirto- ja jakeluverkostoon.

Biokaasua voidaan kuljettaa paineistettuna (CNG) ja nesteytettynä (LBG) niille tarkoitetuilla kuljetuskonteissa. Kuljetuskontit ovat suurimmaksi osaksi standardeja, joita voidaan kuljettaa maan-, rauta- ja meriteitse. Biokaasun kuljettamisessa on otettava huomioon laki vaarallisten aineiden kuljetuksesta (Tukes).

Biokaasun kuljettamiseen tarkoitettujen ajoneuvojen on täytettävä em. lain 7a§ vaatimukset. EU:n direktiivien 2010/39/EU ja 2008/68/EU sisämaankuljetuksia on laajennettu tiettyjen kansainvälisten soveltamisalaa kansallisiin kuljetuksiin, jotta kuljetukset toimisivat EU:n sisällä.

Biokaasun kuljettamiseen rakennettu kuljetuskontti sisältää halutun määrän kaasusäiliöitä, joihin biokaasu täytetään paineistettuna. Kaasusäiliöitä käytetään laajasti eri teollisuuden aloilla, ja Euroopan eri maissa on ollut käytössä maakohtaiset kaasusäiliöiden turvallisuusstandardit ja testausmenetelmät. Nykyään Euroopassa vallitsevana standardina on CEN (Comete European de Normalisation) ja se toimii alustana eri maille jaettaessa tietoa, kokemuksia ja auttaa näin luomaan yhteisesti hyväksyttäviä standardeja. Eri maiden yhteistyön pohjalta on käynnistynyt CEN:in teknillisen komitean (TC 23) työskentely.

Biokaasun kuljettamiseen tarkoitettut säiliötyypit voidaan jakaa neljään ryhmään: CNG-1 metallista valmistettu sylinteri, CNG-2 metallivuoraus, joka on vahvennettu hartsikyllästetyillä jatkuvilla filamenttikuiduilla (lieriöosa päällystetty), CNG-3 metallivuoraus, joka on vahvennettu hartsikyllästetyillä jatkuvilla filamenttikuiduilla (kokonaan päällystetty) ja CNG-4 hartsikyllästetyistä filamenttikuiduista valmistettu päällyste, jossa vuoraus on muuta ainetta kuin metallia (kokonaan komposiittimateriaalia) (TRANS/WP.29/343).

Säiliöissä käytettävät ulko- ja sisäpintamateriaalit ja valmistusmenetelmät vaikuttavat niiden painoon ja hankintahintaan. Henkilöautoissa suositaan käytettäväksi CNG-3 tyyppin säiliötä, joka on metallista CNG-1 säiliötä kevyempi. Säiliön ulko- ja sisäpinnoilla ei pyritä pelkästään säiliön lujuuden varmistamiseen, mutta myös ehkäisemään korroosioita säiliön sisäpuolella, sillä kaikki kaasut sisältävät hieman vettä (CNG Tanks).

3.3 Biokaasu ajoneuvot

3.3.1 Henkilöautot

Suomessa on saatavilla useiden eri autonvalmistajien kaasuautoja. Autojen saatavuuden lisääntyessä myös eri hintaluokkaisten autojen saatavuus on parantunut. Suosituimmat kaasuautoimerkit löytyvät tällä hetkellä mm. Audilta, Volkswagenilta, Skodalta, Opelilta ja Seatilta. Autonvalmistajat tarjoavat kaasuautoja suosituimmista malleistaan, kuten Volkswagen Passat tai Audi A3 ja A4. Ajoneuvojen koko vaihtelee henkilöautosta suuriin kuorma-autoihin. Kaasuautojen hinnat eivät juuri eroa dieselmallisista autoista. Kaasuautojen suurimpana erona fossiilisia polttoaineita käyttäviin autoihin on CO₂-päästöt. Suuremmilla kaasuautoilla hiilidioksidi päästöt ovat alle 100 g/km ja pienemmillä ne voivat tippua alle 70 g/km (Jaala 2014).

Suomessa on myös enenevässä määrin autoja, joihin on tehty ns. jälkiasennus. Jälkiasennusten tekeminen on melko yksinkertaista ja sen on kustannuksiltaan kohtuullisen edullista – noin 2.500 EUR (Terra Gas Finland Oy).

Jälkiasennuksessa autoon asennetaan kaasusäiliö, jonne paineistettu biokaasu voidaan varastoida. Biokaasu on paineistettu 200bar. Kaasusäiliö on kytketty moottoriin magneettiventtiilin ja paineen alentajan kautta, jonka tarkoituksena on pudottaa kaasun paine ilmanpaineen tasolle. Ilmanpaine ei ole kaasun lopullinen virtauspaine moottoriin, tätä säädellään paineensäätäjän avulla. Paineensäätäjän tehtävänä on säädellä syötettävän kaasun paine vastaamaan imusarjojen alipainetta. Kaasun paineen ollessa oikea, virtaa se lopulta kunkin sylinterin injektorin kautta otto-kiertoprosessiin (Biokaasuauto).

3.3.2 Raskasliikenne

Biokaasun käyttö myös raskaanliikenteen ajoneuvoissa on korostunut merkittävästi ilmastopolitiikan myötä. Maakaasua polttoaineena käyttäviä ajoneuvoja on ollut jo pitkään käytössä ympäri maailman joukkoliikenteessä ja näillä toimenpiteillä on ollut myönteinen vaikutus suurkaupunkien liikenteen päästöihin. Kaupunkiliikenteestä saadut hyvät kokemukset ja kuluttajien lisääntynyt tieto ilmaston lämpenemisen syistä on johtanut siihen, että myös raskaan liikenteen ajoneuvojen valmistajat ovat kehittäneet omia, kaasua polttoaineena käyttäviä moottoreita. Eri toimialoilla, kuten esim. elintarviketeollisuuden tuotteita myyvät päivittäistavaraketjut ovat huomanneet saasteettoman logistiikan merkityksen ja vaativat tänä päivänä myymiensä tuotteidensa hiilijalanjäljen ilmenevän myös tavaraketjussa.

Suurella osalla raskaan liikenteen ajoneuvojen valmistajista Euroopassa on jo myynnissä kaasukäyttöisiä ajoneuvoja. Merkittävimmät valmistajat kuten Iveco, Renault, Scania ja Volvo toimittavat ajoneuvoja joko kaupunkijakelun tai pitkän matkan liikenteeseen. Ajoneuvojen moottorit voivat käyttää polttoaineena joko CNG/CBG tai LNG/LBC metaanikaasua. Scania tarjoaa esim. CNG moottoria, jonka yhteydessä on kahdeksan 82 litran CNG-4 komposiittikaasupulloa (yht.656 l) ja ajomatka 260-300 km. Scanian LNG moottorin tankin tilavuus on 728 litraa ja ajomatka noin 1000 km. LNG/LBC kaasujen etu CNG/CBC kaasuihin on siinä, että se tilavuudeltaan kaksi kertaa tehokkaampi. Vastaavia moottorivaihtoehtoja tarjoaa myös muut valmistajat (Scania. Kaasuajoneuvot).

LNG:llä on huomattavasti CNG:tä suurempi energiatiheys (1:600), jolloin yhdellä säiliöllisellä saavutetaan suurempi toimintasäde. LNG on erityisesti raskaanliikenteen polttoaine. LNG:tä säilytetään ajoneuvon metallisessa ja hyvin eristetyssä säiliössä. Säiliössä vallitseva lämpötila on noin

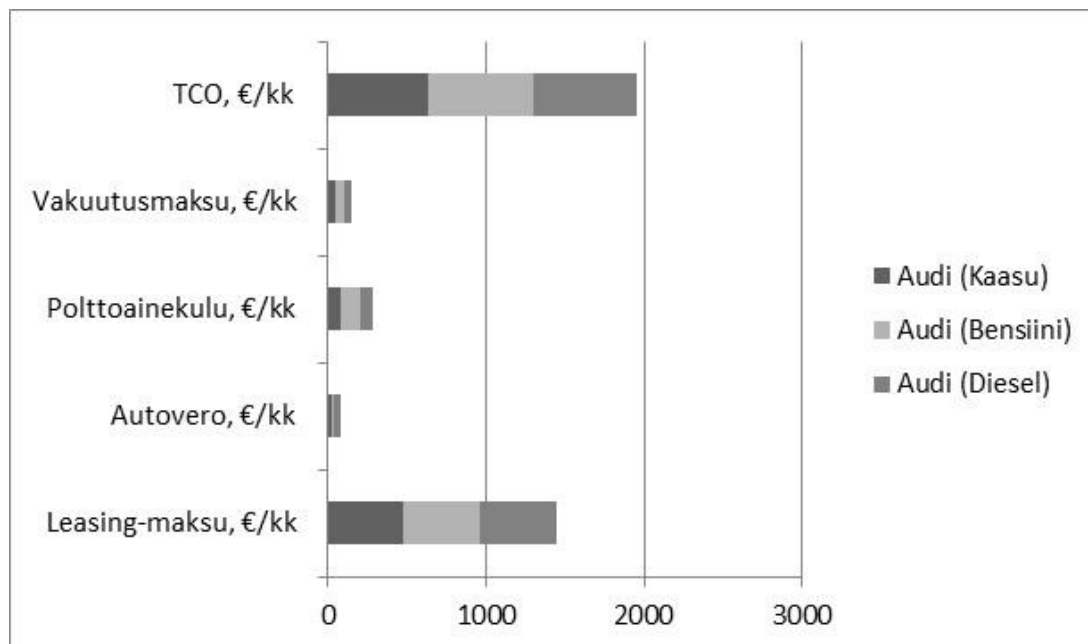
(-140)-(-130) °C ja paine on 5-8 barin välillä. Säiliöstä nesteytetty kaasu johdetaan lämmittimelle, jossa se höyrystetään ennen sen syöttämistä moottoriin. Ajoneuvon ollessa käyttämättömänä, kaasusäiliöön höyryntyy kaasua, mikä nostaa säiliön painetta. Säiliöön on kytketty varoventtiilit, jotka tyhjentävät säiliön höyryntyneestä kaasusta. (Volvo, MethaneDiesel)

Kaasumoottorin CO_2 päästöt ovat yli 20 prosenttia pienemmät kuin dieselmoottorin. Melumittauksen mukaan kaasukäyttöisen moottorin melutaso tyhjäkäynnillä on 82 dB, kun dieselmoottorin luku on 86 dB. Scanian kaasukäyttöinen moottori perustuu dieselmoottoriin ja sen vääntökäyrä on dieselmoottorin kaltainen, mutta vääntöä saadaan jo alhaisemmalla kierrosluvulla.

3.4 Kaasuautojen kustannusanalyysi

Tässä luvussa tavoitteena on arvioida autoilun kokonaiskustannukset Total Cost of Ownership (TCO) mallin mukaisesti ja verrata pidemmällä ajanjaksolla autoilun kokonaiskustannuksia. TCO vertailussa tarkastellaan Audi A3 henkilöautoa ja Volkswagen Caddy pakettiautoa. Tarkastelussa dieselin hintana on käytetty 1,253 euroa/litra, bensiinin hintana 1,372 euroa/litra ja biokaasun hintana 1,45 euroa/kg. Kustannusarvion tavoitteena on vertailla autojen kokonaiskustannuksia kuukausitasolla. Tässä vertailussa käytetty hintatieto on saatu (ALD 2016).

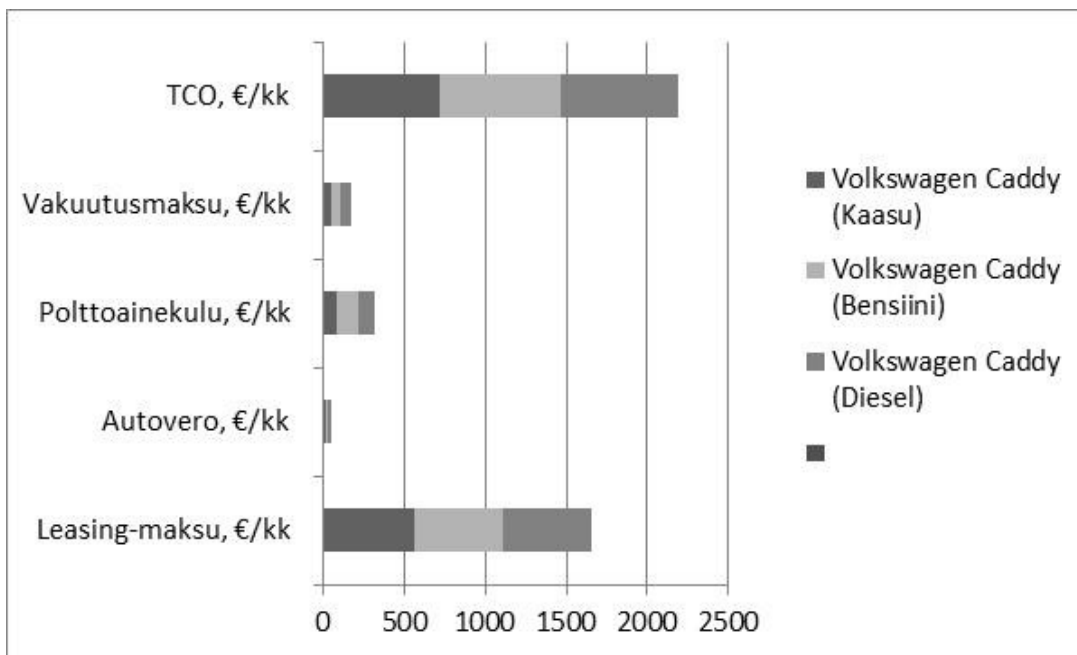
Audi A3 henkilöauto vertailuun valittiin Audi A3 Sportback g-tron Business Edition CNG, Audi A3 Sportback Business 1,4TFSI ja Audi A3 Sportback Business 1.6TDI. Vuokra-aikana on käytetty 36 kuukautta ja kilometrimääränä käytettiin 90 000 km (kuva 5).



Kuva 5. Kustannusvertailu kaas-, bensiini- ja dieselkäyttöisen Audi A3 henkilöauton kuukausikustannuksista, kun vuokra-aika on 36 kuukautta ja kilometrimäärä 90.000 km.

Kuvan perusteella Audi g-tronin kuukausikustannus on 633,74 EUR/kk, dieselukäyttöisen Audin 655,19 EUR/kk ja kallein kuukausikustannus vastaavasti bensiinikäyttöisellä henkilöautolla 668,49 EUR /kk.

Pakettiautovertailuun valittiin Volkswagen Caddy Maxi 1.4 TGI 81 KW, Volkswagen Caddy Maxi 1.4 Tsi 92 KW ja Volkswagen Caddy Maxi 2.0 Tdi 75 KW. Vuokra-aikana käytettiin 60 kuukautta ja kilometrimäärän arvioitiin olevan 100 000 km (kuva 6).



Kuva 6. Eri polttoaineiden hintavertailu, Volkswagen Caddy TGI.

Volkswagen Caddy Maxi 1.4 TGI 81 KW:n arvioitu kuukausikustannus on 720,16 EUR ja vastaavan dieselukäyttöisen pakettiauton kuukausikustannus on 725,02 EUR. Laskelmien perusteella kallein kuukausikustannus on vastaavalla bensiinikäyttöisellä Volkswagen Caddy Maxi 1.4 Tsi 92 KW:llä, 744,79 EUR.

Kustannusvertailu osoittaa, että kokonaiskustannuksia vertailtaessa vuositasolla kaasuautoilu on edullisempaa kuin vastaavilla bensa- ja dieselautoilla ajaminen. Kustannuksiin vaikuttavat ajoneuvovero ja polttoaineen hinta. Ajoneuvovero koostuu perusverosta ja käyttövoimaverosta. Käyttövoimaveron määrätään ajoneuvolle, jota käytetään muulla voimalla tai polttoaineella kuin bensiinillä. Perusvero perustuu ajoneuvon valmistajan ilmoittamiin CO₂-päästöihin, joka ilmoitetaan grammaa kilometriä kohden. Perusvero perustuu Euroopan unionin asettamien direktiivin (80/1268/ETY) mukaisiin päästömittauksiin. Tässä laskelmassa ei ole huomioitu perusveron

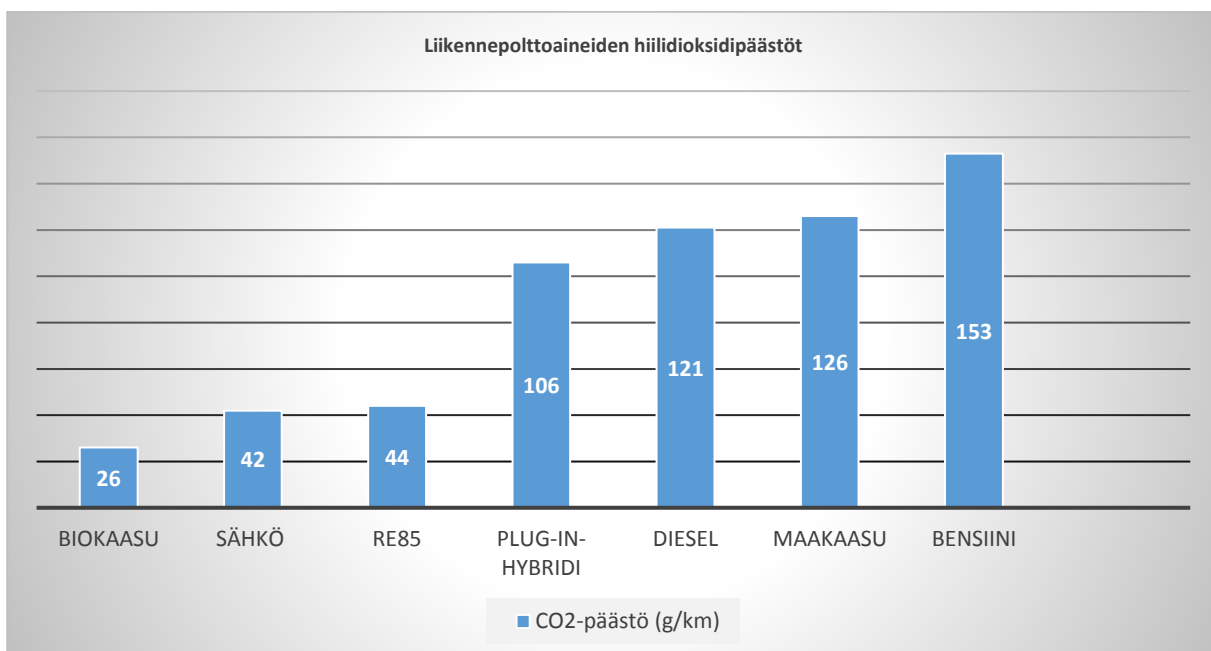
korotusta, joka astuu voimaan 1.1.2017. Korotus koskee kaikkia perusveron alaisia ajoneuvoja ja tämän myötä ajoneuvojen verotus kiristyy 36,50 euroa (Trafi).

4 Johtopäätökset

Suomessa biokaasun teknis-taloudellinen vuotuinen tuotantopotentiaali on eri selvitysten perusteella noin 9,2 TWh. Tämän lisäksi synteettisen biometaanin mahdollinen tuotanto voi merkittävästi lisätä tuotantopotentiaalia. Suomessa liikenteen kokonaisenergia määrä on noin 45 TWh, jolloin biokaasupotentiaali on noin 20 % koko liikennemarkkinasta. Kun yhden auton kulutus on noin 10-11 MWh, biokaasua riittäisi noin 890 000 henkilöauton käyttöön. Raskaanliikenteen (linja-autot, rekat) kulutus on vastaavasti noin 30-40 kertainen henkilöautoon verrattuna.

Biokaasulaitoksia on Suomessa jo useita ja uusia laajennusinvestointeja ja kokonaan uusia hankkeita on suunnitteilla jo laajasti koko Suomessa. Myös erilaisten jakeiden hyödyntämismahdollisuuksia parannetaan uusien investointien ja hankkeiden myötä jatkuvasti. Tämä kehitys vastaavasti mahdollistaa teknis-taloudellisen biokaasun tuotantopotentiaalın kasvattamisen merkittävästi nykyisestä tasosta.

Biokaasu mahdollista merkittävän CO_2 -päästöjen vähentämisen liikenteessä, eli ns. päästökaupan ulkopuolisella sektorilla (kuva 7).



Kuva 7. Liikennepolttoaineiden hiilidioksidipäästöt (Vuohelainen 2015).

Laskelmien perusteella myös biokaasuautoilu on halvempaa kuin bensa- ja dieselajoneuvoilla.

Nämä edellä mainitut seikat vahvistavat sen, että biokaasuautoilu on todellinen, taloudellinen, vaihtoehto kun mietitään eri teknologioita, joiden avulla päästään Suomessa liikenteen kasvihuonepäästöjen vähentämistavoitteisiin.

5 Yhteenveto

Kaasuajoneuvojen kysynnän lisääntyminen lähtee tietysti kuluttajista. Jotta vähäpäästöisten autojen määrä Suomessa liikenteessä kasvaa on löydettävä keinoja, joilla edistetään yksityisen sekä julkisen liikenteen siirtymistä vähäpäästöisiin polttoaineisiin. Vain tätä kautta voidaan varmistaa se, että autojen valmistajat ja myyjät tuovat Suomeen laajan valikoiman kaasuautoja. Tämä on myös ainoa keino, miten käytettyjen kaasuautojen markkinat Suomessa kasvaisivat. Kuluttajille on luotava hyvät kannustimet, jotka edesauttavat siirtymistä vähäpäästöisempään autoiluun.

Liikennekaasun tuotantovolyymien tulee kehittyä ennen kaikkea ns. jakelu- ja siirtoverkoston ulkopuoliselle alueelle. Tämä edellyttää sitten erilaisten kuljetustekniikoiden kehittämistä. Kaasun kuljettaminen paineistettuna tai nestemäisenä konteissa, voisi olla ratkaisu kaasunjakeluun siirtoverkoston ulkopuolisille alueille. Kuljetettavia kontteja voitaisiin sijoittaa jo olemassa olevien tankkausasemien yhteyteen. Näin kyettäisiin rakentamaan laajaa kaasun tankkausverkostoa koko Suomen alueelle.

Suomessa biokaasulaitosten määrä on kasvanut reilusti viimeisten vuosien aikana. Tämä mahdollistaa kaikkien teollisuuksien ja toimialojen biojätteiden kokonaisvaltaisen hyödyntämisen laajalti ympäri Suomen. Kun paikallisten yritysten ja toimijoiden biojätteet pystytään hyödyntämään biokaasun valmistukseen, voidaan puhua lähienergiasta. Samalla biojätteistä syntyneet mädätysjäännökset prosessoidaan, jotka voidaan hyödyntää lannoitteeksi tai täyttömaaksi.

Lähdeluettelo

Asplund, D., Korppi-Tommola, J., Helynen, S. 2005. Uusiutuvan energian lisäysmahdollisuudet vuoteen 2015. Kauppa- ja teollisuusministeriö.

Biokaasuauto. www.biokaasuauto.fi/kaasuauto/miten-toimii.

Biokaasuauto. Biokaasun edut. <http://www.biokaasuauto.fi/biokaasun-edut>.

Biokaasuauto. Biokaasun jalostus biometaaniksi. <http://www.biokaasuauto.fi/biokaasu/biokaasusta-biometaania>.

CNG Tanks. <http://www.cngschool.com/cng-tanks>

Deublein, D., Steinhauser, A. 2008. Biogas from Waste and Renewable Resources.

Energia- ja ilmastostrategia. 24.11.2016. <http://tem.fi/energia-ja-ilmastostrategia>.

Energia- ja ilmastotiekartta 2050. Parlamentaarisen energia- ja ilmastokomitean mietintö 16. päivänä lokakuuta 2014.

Erjava, A. 2009. Biokaasulaitoksen perustaminen kasvihuonetilalla – taustatietojen selvitys. Jyväskylän Ammattikorkeakoulu.

Gasification guide 2009. Guideline for Safe and Eco-friendly Biomass Gasification. European Commission 2009. http://www.gasification-guide.eu/gsg_uploads/documenten/D10_Final-Guideline.pdf.

Gasum. <http://www.gasum.fi>.

Hatsala, A. 2004. Biokaasun tuotanto- ja käyttömahdollisuudet Kanta-Hämeessä. Hämeen ammattikorkeakoulu, opinnäytetyö.

Hobson, P., Wheatley, A. 1993. Anaerobic digestion modern theory and practice.

Kaasuyhdistys. <http://www.kaasuyhdistys.fi/sisalto/kaasutilastot>.

Jaala, J. 2014. <http://www.autotie.fi/tien-sivusta/kaasuautot-puntarissa>

Kaparaju, P., Luostarinen, S., Kalmari, E., Kalmari, J., Rintala, J. 2002. Co-digestion of energy crops and industrial confectionery by-products with cow manure: batch scale and farm-scale evaluation. Water Science and Technology Vol.45, No10: 275-280.

- Kymäläinen, M., Pakarinen, O. 2015. Biokaasuteknologia – Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen. Suomen Biokaasuyhdistys ry. HAMK Publications 2015.
- Laki vaarallisten aineiden kuljetuksesta. <http://plus.edilex.fi/tukes/fi/lainsaadanto/19940719?toc=1>.
- Lampinen, A. 2002. Stirling-kone opetusvälineestä hyötykäyttöön. *Arkhimedes* Vol.54, No.6:19-23.
- Lampinen, A. 2003. Jätteiden hliikennekäyttöpotentiaali Suomessa. *Kuntatekniikka* 1: 31-34.
- Lampinen, A. 2013. Development of biogas technology systems for transport. *Tekniikan Waiheita* Vol.31, No.3: 5-37.
- Lampinen, A. 2016. Liikennebiokaasun tuotanto ja käyttö vuonna 2015.
- Latvala, M. 2009. Paras käytettävissä oleva tekniikka (BAT) Biokaasun tuotanto suomalaisessa toimintaympäristössä. *Suomen Ympäristö 24 | 2009*. Suomen ympäristökeskus, Helsinki. (https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/37998/sy_24_2009.pdf?sequence=1).0.
- Lehtomäki, A. 2006. Biogas production from energy crops and crop residues. University of Jyväskylä, Department of Biological and Environmental Science. Finland.
- Lehtomäki, A., Paavola, T., Luostarinen, S., Rintala, J. 2007. Biokaasusta energiaa maatalouteen – raaka-aineet, teknologiat ja lopputuotteet. Jyväskylän yliopisto. Jyväskylän yliopiston bio- ja ympäristötieteiden laitoksen tiedonantoja 85.
- Lehtomäki, A., Viinikainen, T., Rintala, J. 2008. Screening boreal energy crops and crop residues for methane biofuel production. *Biomass and Bioenergy*. Vol.32:541-550.
- Lohiniva, E., Mäkinen, T., Sipilä, K. 2001. Lietteiden käsittely Uudet ja käytössä olevat tekniikat, Vtt tiedotteita – Meddelanden– Research notes 2081.
- Maa- ja metsätalousministeriö. <http://mmm.fi/elaimet-kasvit/elaimista-saatavat-sivutuotteet-ja-niista-johdetut-tuotteet>.
- Machie, R., Bryant, M. 1995. Anaerobic digestion of cattle waste at mesophilic and thermophilic temperatures. *Applied Microbiology and Biotechnology*. Vol.43: 346-350.
- Mikkonen, L., Kauriinoja, A. 2011. Energiaa biomassasta ja jätteistä. Mädätys, kaasutus, biomassan poltto, pyrolyysi ja alkoholikäyminen: Laitosten asennus, turvallisuus ja ylläpito. *Micro Energy to Rural Enterprise*.

Mutikainen, M., Sormunen, K., Paavola, H., Haikonen, T., Väisänen, M. 2016. Biokaasusta-kasvua-biokaasuliiketoiminnan-ekosysteemien-mahdollisuudet. Sitran selvityksiä. ISBN 978-951-563-961-5 ISSN 1796-7112.

Nevalainen, O. 2011. Teurasjätteen jalostaminen liikennepolttoaineiksi. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Ympäristötekniikan koulutusohjelma.

Rantanen, P., Valve, M., Kangas, A. 2008. Lietteen loppusijoitus –esiselvitys. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 1/2008.

Sarlin. Biokaasun jalostuslaitokset. http://www.sarlin.com/sarlin_products/Biokaasun-puhdistus-jajalostuslaitokset/tcxkbgfx/2a12e6e6-e2e0-4eb1-a63f-9399f4ca1b25.

Scania. Kaasuajoneuvot. <http://docplayer.fi/6346627-Scanian-euro-6-mallisto-toimivaksi-todistettu-teknologia-ja-ratkaisu-kaikkiin-tarpeisiin.html>

Seppälä, M., Paavola, T., Lehtomäki, A., Rintala, J. 2009. Biogas production from boreal herbaceous grasses – specific methane yield and methane yield per hectare. Bioresource Technology Vol.100: 2952-2958.

Seppälä, A., Kässi, P., Lehtonen, H., Aro-Henilä, E., Niemeläinen, O., Lehtonen, E., Höhn, J., Salo, T., Keskitalo, M., Nysand, M., Winquist, E., Luostarinen, S., Paavola, T. 2014. Nurmesta biokaasua liikennepolttoaineeksi. Bionurmihankkeen loppuraportti. MTT Raportti 151.

Schäfer, W., Lehto, M., Teye, F. 2006. Dry anaerobic digestion of organic residues on-farm – a feasibility study. MTT Agrifood Reserach Finland. ISBN 952-487-007-X.

Taavitsainen, T. 2006. Maatalouden biokaasulaitoksen perustaminen ja turvallisuustarkastelu. Savonia-ammattikorkeakoulun. Julkaisusarja D 5/2006 (MaLLa2-hankkeen loppuraportti).

Terra Gas Finland Oy. <http://www.terragas.fi/tuotteet.html>.

[Tilastokeskus, 2014 energiatileasto. http://www.stat.fi/til/ene.html](http://www.stat.fi/til/ene.html).

[Trafi. http://www.suomenautokierratys.fi/ajankohtaista](http://www.suomenautokierratys.fi/ajankohtaista).

[TRANS/WP.29/343. http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=CELEX:42015X0630\(01\)](http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=CELEX:42015X0630(01)).

[Tukes. http://plus.edilex.fi/tukes/fi/lainsaadanto/19940719?toc=1](http://plus.edilex.fi/tukes/fi/lainsaadanto/19940719?toc=1).

- Tähti, H., Rintala, J. 2010. Biometaanin ja –vedyn tuotantopotentiali Suomessa. Jyväskylä. Jyväskylän yliopiston bio- ja ympäristötieteiden laitoksen tiedonantoja 90. ISBN 978-951-39-4043-0.
- Vertès, A., Qureshi, N., Blaschek, H., Yukawa, H. 2010. Biomass to Biofuels: Strategies for Global Industries. United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd.
- Vuohelainen, S. 2015. Etanoli henkilöauton polttoaineena. Metropolia Ammattikorkeakoulu.
- Weiland, P. 2003. Production and energetic use of biogas from energy crops and waste in Germany. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. Vol.109: 263-274.
- Weilander, P. 2006. Anaerobic digestion of agricultural waste and selected biomass. Teoksessa: *Proceedings Venice 2006. Biomass and Waste to Energy Symposium*. Venetsia, Italia 29.11-1.12.2006.
- Wellinger, A. 1999. Process design of agricultural digesters. <http://www.ad-nett.org>.
- Winqvist, E., Luostarinen, S., Kässi, P., Pyykkönen, V., Regina, K. 2015. Maatilojen biokaasulaitosten kannattavuus ja kasvihuone- kaasujen päästövähennys. *Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus* 36.
- Zeeman, G., Wiegant, V., Koster-Treffen, M., Lettinga, G. 1985. The influence of the total ammonia concentration on the thermophilic digestion of cow manure. *Agricultural Wastes*. Vol.14: 19-35.