

Pro gradu -tutkielma

**Alueellinen liikennebiokaasun tuotanto, siirto ja jakelu
– esimerkkitapauksena Keski-Suomen maakunta**

Saana Ahonen



Jyväskylän yliopisto

Bio- ja ympäristötieteiden laitos

Ympäristötiede ja -teknologia

22.7.2010

JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO, Matemaattis-luonnontieteellinen tiedekunta
 Bio- ja ympäristötieteiden laitos
 Ympäristötiede ja -teknologia

AHONEN, SAANA: Alueellinen liikennebiokaasun tuotanto, siirto ja jakelu -
 esimerkkitaupauksena Keski-Suomen maakunta
 Pro gradu -tutkielma: 73 s.
 Työn ohjaajat: Professori Jukka Rintala, FT Saija Rasi
 Tarkastajat: Professori Jukka Rintala, FT Sanna Marttinen
 Heinäkuu 2010

Hakusanat: biokaasun puhdistuslaitos, investointikustannukset, käyttökustannukset, biokaasun siirto, kaasun tankkausasema

TIIVISTELMÄ

Tämän työn tavoite oli arvioida Keski-Suomen liikennebiokaasupotentiaali sekä biokaasuverkon kustannukset sisältäen biokaasun puhdistuksen, puhdistetun kaasun siirron tankkausasemille ja kaasun tankkausasemat. Biokaasun tuotannon kustannukset jäivät tämän tarkastelun ulkopuolelle. Biokaasu koostuu suurimmaksi osaksi metaanista ja hiilidioksidista, ja sitä tuotetaan bioteknisesti mikro-organismeilla anaerobisessa prosessissa. Biokaasu on uusiutuva energianlähde, jonka liikennepolttoainekäytöllä voidaan vähentää kasvihuonekaasupäästöjä ja lisätä energiaomavaraisuutta. Ennen liikennepolttoainekäyttöä biokaasusta on poistettava hiilidioksidi kaasun energiasisällön nostamiseksi. Biokaasun ominaisuuksista riippuen myös muita yhdisteitä voidaan joutua poistamaan. Suosituimmat menetelmät biokaasun puhdistukseen ovat paineenvaihteluadsorptio ja vesiabsorptio. Puhdistettua biokaasua kutsutaan biometaaniksi.

Biokaasun puhdistuksen kustannuksiin vaikuttaa eniten puhdistuslaitoksen koko. Kustannukset yhtä kuutiometriä biokaasua kohden ovat pienemmät suuremmilla puhdistuslaitoksilla. Jos Keski-Suomessa tuotettavissa oleva biokaasu puhdistettaisiin liikennepolttoaineeksi $500 \text{ Nm}^3_{\text{biokaasua}}/\text{h}$ käsittelevissä laitoksissa (19 kpl), olisivat biokaasun puhdistuksen investointikustannukset noin 19-26 milj. €. Pääoma- ja käyttökustannukset sisältävät kokonaiskustannukset olisivat noin $0,17 \text{ €/Nm}^3_{\text{biometaania}}$ eli noin 8 milj. €/a. Puhdistuslaitoksen käyttöajaksi oletettiin 8520 h/a. Keski-Suomessa olisi teknisesti mahdollista tuottaa noin 480 GWh biometaania/a, mikä vastaa 17 % maakunnan tieliikenteen vuoden 2008 polttonesteenkulutuksesta. Keski-Suomen liiton tavoitteeseen saavuttaa liikennebiokaasun käytössä 25 GWh:n taso vuoteen 2015 mennessä päästäisiin, jos maakunnassa vuosittain muodostuvista teollisuuden ja yhdyskuntien orgaanisista jätteistä tuotettavasta biokaasusta (50 GWh) puolet puhdistettaisiin liikennepolttoaineeksi.

Keski-Suomen biokaasuverkon kustannusarviot riippuvat pitkälti kaasun puhdistusta, siirtoa ja tankkausasemia koskevista lähtöoletuksista. Jos Keski-Suomen biokaasupotentiaali puhdistettaisiin viidessä $2000 \text{ Nm}^3_{\text{biokaasua}}/\text{h}$ käsittelevässä laitoksessa, jokaista kaasun tankkausasemaa kohden rakennettaisiin 3 km kaasun siirtoputkea ja kaasu jaeltaisiin 11:ssä kapasiteetiltaan $500 \text{ Nm}^3_{\text{biometaania}}/\text{h}$ kaasun tankkausasemilla, olisivat biokaasuverkon kokonaiskustannukset 15 vuoden takaisinmaksuajalla ja 6 % korolla 11,4 milj. €/a tai $0,23 \text{ €/Nm}^3_{\text{biometaania}}$. Liikennebiokaasun käyttöä suunniteltaessa on tärkeää kokonaisvaltainen ymmärrys biokaasuverkon eri osien välisistä suhteista verkon kokonaiskustannuksiin.

UNIVERSITY OF JYVÄSKYLÄ, Faculty of Science
 Department of Biological and Environmental Science
 Environmental Science and Technology

AHONEN, SAANA: Biogas as a transport fuel –regional transport biogas supply chain in Central Finland
 Master thesis: 73 p.
 Supervisors: Professor Jukka Rintala, PhD Saija Rasi
 Inspectors: Professor Jukka Rintala, PhD Sanna Marttinen
 July 2010

Key Words: biogas upgrading plant, investment cost, operating cost, distribution of biogas, gas filling station

ABSTRACT

In this thesis the transport biogas potential in Central Finland and the costs of a transport biogas supply chain are evaluated. The supply chain includes biogas upgrading, distribution of upgraded gas and gas filling stations. Biogas is a renewable energy source, composed mainly of methane and carbon dioxide. It is produced from organic matter by anaerobic digestion. By using biogas as a transport fuel, it is possible to decrease greenhouse gas emissions and increase energy self-sufficiency. Before it can be used as a fuel in vehicles, biogas has to be upgraded by removing carbon dioxide. Depending on the characteristics of the gas also other compounds may need to be removed. There are different techniques for biogas upgrading, the most widely used being pressure swing adsorption and water absorption. Upgraded biogas is called biomethane.

The capacity of a biogas upgrading plant has the biggest effect on the costs of upgrading. The cost per one cubic meter of raw biogas is lower in bigger upgrading plants. If the biogas potential of Central Finland was upgraded in 19 plants each with a capacity of 500 Nm³_{biogas}/h, investment cost of biogas upgrading would be approx. 19-26 million €. Total cost including capital costs and operating costs would be 0,17 €/Nm³_{biomethane} or 8 million €/a. The operational time of an upgrading plant was presumed to be 8520 h/a. In Central Finland it would be technically possible to produce 480 GWh biomethane/a, which is 17 % of the total amount of fuel consumed by road traffic in the region in 2008. The target of Central Finland to achieve a level of 25 GWh in the use of biogas as transport fuel in year 2015 could be met if only half of the biogas from industrial and municipal organic waste (50 GWh) was upgraded to biomethane.

The costs of a biogas supply chain in Central Finland depend largely on the presumptions made on biogas upgrading, type of distribution of biomethane and the capacity and amount of biomethane filling stations. If the biogas potential of Central Finland was upgraded in five upgrading plants (cap. 2000 Nm³_{biogas}/h), 3 km of gas pipeline was build for every filling station for the distribution of the gas and 11 filling stations (cap. 500 Nm³_{biomethane}/h) were used for delivering the gas, total cost of the biogas supply chain with 15 year payback time and 6 % interest would be 11,4 million €/a or 0,23 €/Nm³_{biomethane}. When planning a biogas supply chain, it is important to have a holistic understanding on the relationships between the different stages of the chain and their effect on the overall costs.

ESIPUHE

Tämä tutkielma liittyy maakunnalliseen *Biokaasusta energiaa Keski-Suomeen* - tutkimushankkeeseen. Hankkeen päärahoittajana toimi Keski-Suomen liitto. Jyväskylän yliopistosta hankkeeseen osallistuivat bio- ja ympäristötieteiden laitos ja taloustieteiden tiedekunta. Hankkeen aikana Bio- ja ympäristötieteiden laitoksella selvitettiin Keski-Suomen alueella muodostuvia biokaasun tuotantoon soveltuvia biomassaresursseja sekä biokaasun liikennepolttoainekäyttöä. Tässä työssä tutkittiin Keski-Suomen liikennebiokaasun tuotantopotentiaalia sekä biokaasun puhdistuksen, siirron ja jakelun kustannuksia.

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO	7
2 TUTKIMUKSEN TAUSTA	8
2.1 Yleistä biokaasusta	8
2.2 Biokaasun käyttö ajoneuvoissa	10
2.3 Biokaasun tuotannon ja liikennepolttoainekäytön ympäristönäkökohdat.....	11
2.4 Biokaasun liikennepolttoainekäyttöön vaikuttavat tavoitteet ja lainsäädäntö.....	13
2.5 Laatuvaatimukset ajoneuvokäytössä ja maakaasuverkossa	14
2.6 Biokaasun puhdistusmenetelmiä	15
2.6.1 Hiilidioksidin poistaminen biokaasusta.....	18
2.6.2 Rikkivedyn poistaminen biokaasusta	21
2.6.3 Muiden yhdisteiden poistaminen.....	22
2.7 Biokaasun puhdistusmenetelmien vertailu	24
2.8 Biokaasun puhdistuksen kustannukset	28
2.8.1 Investointikustannukset	28
2.8.2 Käyttökustannukset	30
2.8.3 Biokaasun puhdistuksen kokonaiskustannukset.....	32
2.9 Biokaasun siirto ja jakelu	34
2.9.1 Biokaasun siirto	35
2.9.2 Kaasun tankkausasemat.....	37
2.9.3 Esimerkkejä kaasun tankkausasemista	38
3 AINEISTO JA MENETELMÄT	42
3.1 Kohdealue: Keski-Suomi	42
3.2 Biokaasuntuotannon raaka-aineet.....	43
3.3 Kaasun siirtoputkiston ja tankkausasemien kustannukset.....	45
3.4 Keski-Suomen biokaasupotentiaalin ja biokaasun puhdistuslaitosten lukumäärän määrittäminen	46
3.5 Biokaasun puhdistuksen kustannusten määrittäminen	47
3.5.1 Keski-Suomen biokaasupotentiaalin puhdistuksen kustannukset	47
3.5.2 Biokaasun puhdistuksen kustannusten kuntakohtainen arvio	47
3.6 Keski-Suomen biokaasuverkon kustannusten määrittäminen	48
4 TULOKSET	49
4.1 Keski-Suomen biokaasupotentiaali ja biokaasun puhdistuslaitosten lukumäärä ..	49
4.2 Biokaasun puhdistuksen investointi- ja kokonaiskustannukset.....	50
4.2.1 Keski-Suomen biokaasupotentiaalin puhdistuksen kustannukset	50
4.2.2 Biokaasun puhdistuksen kuntakohtaiset kustannukset	52
4.3 Keski-Suomen biokaasuverkon kustannukset	54
4.3.1 Biokaasun puhdistus	54
4.3.2 Puhdistetun biokaasun siirto ja kaasun tankkausasemat.....	56
4.3.3 Koko biokaasuverkko	58
5 TULOSTEN TARKASTELU	61
5.1 Keski-Suomessa tuotettavissa olevan biokaasun määrä.....	61
5.2 Keski-Suomen biokaasupotentiaalin puhdistuksen kustannukset	63
5.3 Keski-Suomen biokaasuverkon kustannukset ja muita liikennebiokaasun tuotantoon ja käyttöön vaikuttavia tekijöitä	65
6 JOHTOPÄÄTÖKSET	69
KIITOKSET	69
KIRJALLISUUS	69

LYHENNELUETTELO

a	vuosi
CH ₄	metaani
CO ₂	hiilidioksidi
FeCl ₃	rautakloridi
Fe ₂ O ₃	rautaoksidi
Fe(OH) ₃	rautahydroksidi
FeS	rautasulfidi
FFV	flexifuel
h	tunti
H ₂	vety
H ₂ O	vesi
H ₂ S	rikkivety
J	joule
K ₂ CO ₃	kalsiumkarbonaatti
kpl	kappale
l	litra
LNG	liquid natural gas, nestemäinen maakaasu
g	gramma
m	metri
m ²	neliometri
m ³	kuutiometri
MDEA	metyylidietanoliamiini
MEA	monoetanoliamiini
N ₂	typpi
NaHS	natriumvetysulfidi
Na ₂ S	natriumsulfidi
NH ₃	ammoniakki
Nm ³	normaalikuutiometri, määritetään normaaliolosuhteissa 0 °C lämpötilassa ja 1,0325 bar paineessa. 1 Nm ³ biokaasua vastaa noin 1 litraa dieseliä ja 1,1 litraa bensiiniä.
NMHC	ei-metaaniset hiilivedyt
NO _x	typen oksidit
O ₂	happi
phi	suhteellinen kosteus
PM	particle matter, pienhiukkaset
ppm	parts per million, miljoonasosa
snt	eurosentti
t	tonni
toe	ton of oil equivalent, öljykvivalenttitonni
TS	total solids, kuiva-aine
vol-%	tilavuusprosentti
W _{alempi}	alempi wobbeluku
W _{ylempi}	ylempi wobbeluku
Wh	wattitunti
°C	celsiusaste
€	euro

1 JOHDANTO

Biokaasua tuotetaan bioteknisesti hajottamalla orgaanista ainetta anaerobisissa olosuhteissa. Vuonna 2007 Euroopan Unionin jäsenmaissa tuotettiin 5,9 miljoonaa öljykvivalenttitonnia biokaasua. Vuoteen 2006 verrattuna biokaasun tuotanto kasvoi 20,5 %. Noin puolet biokaasusta tuotetaan kaatopaikoilla. Toiseksi eniten biokaasua tuottavat EU:ssa jätevedenkäsittelylaitokset (EurObserv'ER 2008). Biokaasu koostuu enimmäkseen metaanista (CH₄) ja hiilidioksidista (CO₂). Maakaasuun verrattuna hiilidioksidin määrä on biokaasussa suurempi (Persson & Wellinger 2006, Petersson & Wellinger 2009).

Biokaasu on uusiutuva energianlähde ja sen käytöllä voidaan pienentää kasvihuonekaasupäästöjä. Maataloudessa ja jätteiden käsittelyssä tuotetun metaanin hyödyntäminen energiantuotannossa vähentää metaanipäästöjä ilmakehään. Metaani on yli 20 kertaa voimakkaampi kasvihuonekaasu kuin hiilidioksidi, joten metaanipäästöjen vähentämisellä voidaan hillitä ilmastonmuutosta. Lisäksi biokaasun käyttö energianlähteenä vähentää riippuvuutta fossiilista energianlähteistä ja tuontienergiasta (IPCC 2007, Petersson & Wellinger 2009).

Suurin osa biokaasusta käytetään sellaisenaan sähkön ja lämmön tuotantoon, mutta kiinnostus biokaasun käyttöön liikennepolttoaineena on lisääntynyt. Liikenne on yksi suurimmista kasvihuonekaasupäästöjen aiheuttajista Euroopassa. Sisäinen liikenne tuottaa 21 % EU:n kasvihuonekaasupäästöistä, ja nämä päästöt ovat kasvaneet vuodesta 1990 noin 23 % (Euroopan yhteisöjen komissio 2006). EU:n uusiutuvia energiamuotoja koskevan tavoitteen mukaan uusiutuvien energianlähteiden osuutta EU:n energiankulutuksesta tulisi nostaa 20 %:ia ja kasvihuonekaasupäästöjä vähentää 20 %:ia vuoteen 2020 mennessä. Uusiutuvien polttoaineiden käytön vähimmäistavoitteeksi on asetettu 10 % osuus bensiinin ja dieselin kokonaiskulutuksesta liikenteessä vuoteen 2020 mennessä (Directive 2009/28/EC).

Biokaasua voidaan käyttää polttoaineena kaasuautoissa. Ennen käyttöä liikennepolttoaineena biokaasusta tulee poistaa epäpuhtaudet, jotta se täyttäisi laitteiden laatuvaatimukset, kaasun lämpöarvo olisi korkeampi ja kaasun laatu tasainen. Puhdistamattomassa biokaasussa usein esiintyvät epäpuhtaudet kuten rikkiyhdisteet voivat aiheuttaa mm. korroosiota laitteistoissa. Hiilidioksidin poisto biokaasusta nostaa kaasun lämpöarvoa. Ruotsalaisen standardin mukaan metaanipitoisuus liikennepolttoaineena käytettävässä biokaasussa tulee olla 95–99 % (Petersson & Wellinger 2009). Biokaasun käyttö liikennepolttoaineena vähentää liikenteen aiheuttamia hiilidioksidipäästöjä, sillä biokaasun palaessa muodostuvat hiilidioksidipäästöt ovat osa hiilen luonnollista kiertoa. Lisäksi biokaasua polttoaineena käyttävien autojen typenoksidi- ja hiukkaspäästöt sekä meluhaitat ovat pienempiä kuin bensiini- ja dieselajoneuvoilla. Käyttämällä biokaasua liikennepolttoaineena voidaan korvata fossiilisten polttoaineiden käyttöä (NSCA 2006).

Biokaasun puhdistukseen on olemassa useita tekniikoita. Näistä käytetyimpiä ovat vesiabsorptio ja painenvaihteluadsorptio. Lisäksi uusia biokaasunpuhdistusmenetelmiä kehitetään jatkuvasti. Puhdistusprosessi nostaa liikennepolttoaineena käytettävän biokaasun tuotantokustannuksia, joten puhdistustekniikan valintaa tulee harkita tapauskohtaisesti (Natural Resources Canada 2007, Petersson & Wellinger 2009).

Keski-Suomen liiton laatimassa maakuntasuunnitelmassa on asetettu 4 TWh:n uusiutuvan energian lisäystavoite vuoteen 2015 mennessä. Suunnitelman mukaan erityisesti bioenergian käyttöä maakunnan alueella tehostettaisiin. Tavoitteena on muun muassa saavuttaa liikennebiokaasun käytössä 25 GWh:n taso vuoteen 2015 mennessä

(Paananen 2007). Tämän työn tavoite oli tarkastella biokaasun liikennepolttoainekäyttöä Keski-Suomessa, verrata biokaasun puhdistusmenetelmiä ja niiden kustannuksia, selvittää biokaasun kuljetus- ja jakeluvaihtoehtoja sekä tehdä arvio biokaasuverkon kustannuksista Keski-Suomen alueella tuotettavissa olevan liikennebiokaasun määrän perusteella.

2 TUTKIMUKSEN TAUSTA

2.1 Yleistä biokaasusta

Anaerobisella käsittelyllä voidaan tuottaa biokaasua uusiutuvista energianlähteistä, kuten eläinten lannasta, kasvibiomassasta, teollisuuden ja yhdyskuntien orgaanisista jätteistä sekä jätevedenpuhdistamoiden lietteistä. Biokaasun lisäksi prosessissa muodostuu käsittelyjäännöstä, jota voidaan biokaasun raaka-aineesta ja tuotantoprosessista riippuen käyttää lannoitteena maataloudessa. Tällöin käsittelyjäännöksen sisältämät ravinteet saadaan kasvintuotantoon. Biokaasua tuotetaan sekä pienen mittakaavan biokaasulaitoksissa, kuten maataloilla, että suuremmissa biokaasureaktoreissa. Biokaasua voidaan myös kerätä talteen kaatopaikoilta, jossa sitä muodostuu orgaanisen jätteen hajotessa (Rutledge 2005, Petersson & Wellinger 2009).

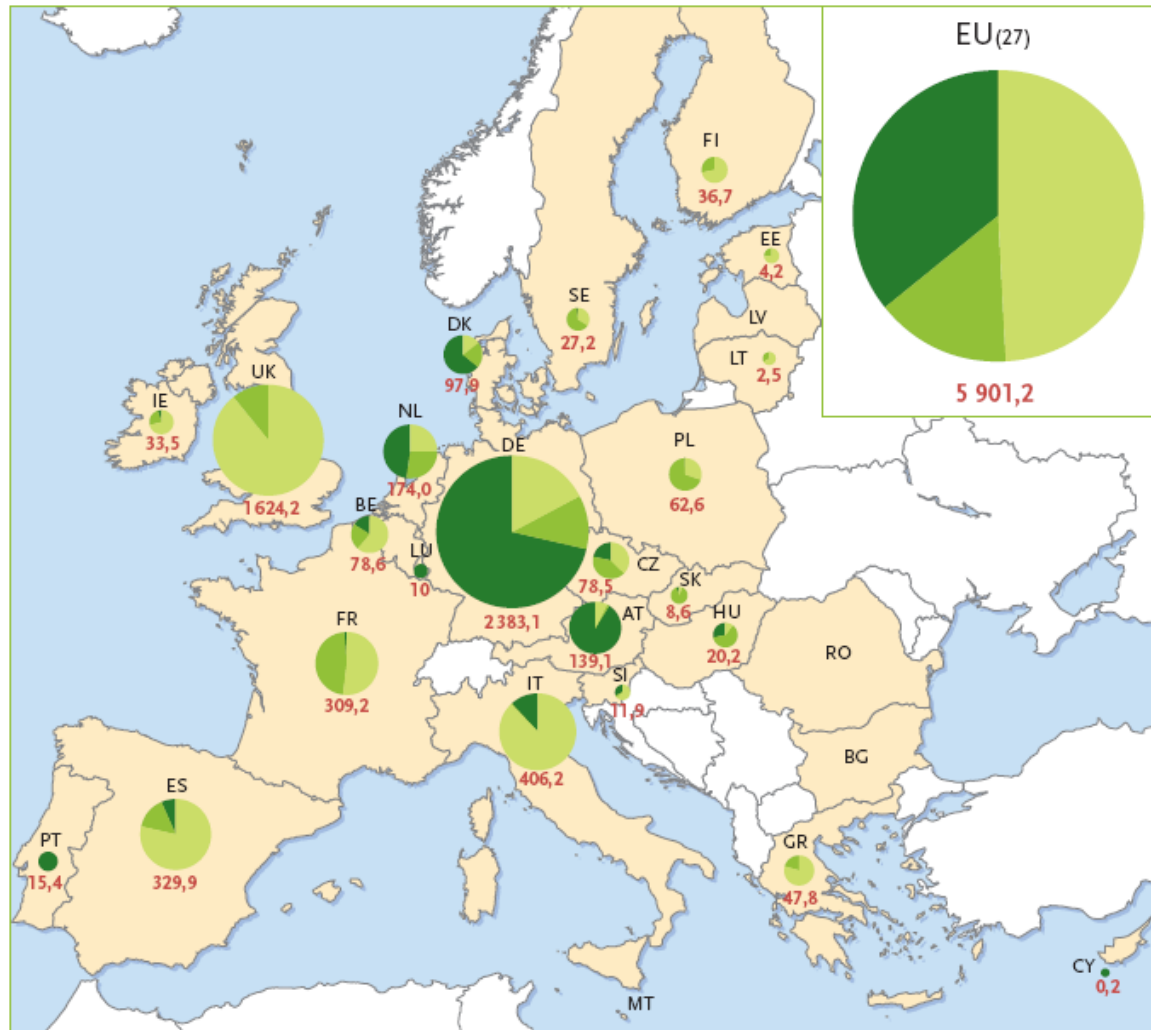
Biokaasu koostuu suurimmaksi osaksi metaanista ja hiilidioksidista. Lisäksi siinä voi olla muita yhdisteitä kuten rikkivetyä (H_2S), ammoniakkia (NH_3), vetyä (H_2), typpeä (N_2), tyydyttyneitä tai halogenoituja hiilivetyjä sekä happea (O_2). Biokaasussa on usein myös kosteutta, ja se voi sisältää pölypartikkeleita ja orgaanisia silikoniyhdisteitä eli siloksaaneja (Persson & Wellinger 2006). Biokaasun koostumus vaihtelee raaka-aineen ja tuotantotavan mukaan (taulukko 1). Kaatopaikkakaasun metaanipitoisuus on yleensä pienempi kuin biokaasulaitoksilla tai jätevedenpuhdistamoilla tuotetun biokaasun. Kaatopaikkakaasu sisältää yleensä myös enemmän typpeä, joka pääsee kaasuun ilman mukana kun kaasu kerätään kaatopaikalta. Suurin eroavaisuus biokaasun ja maakaasun välillä on hiilidioksidin määrässä. Hiilidioksidi on biokaasun suurimpia komponentteja, kun taas maakaasussa sitä on yleensä vähemmän (Mark ym. 1980, Petersson & Wellinger 2009). Vaikka metaani on maakaasun pääkomponentti, maakaasun koostumus voi vaihdella huomattavasti tuotantolähteen mukaan. Suomeen tuotava maakaasu sisältää noin 98 % metaania (Maakaasuyhdistys r.y. 2004).

Taulukko 1. Tyypillisiä biokaasun koostumuksia verrattuna Suomeen tuotavaan siperialaiseen maakaasuun (Jönsson ym. 2003, Maakaasuyhdistys r.y. 2004, Petersson 2008, Petersson & Wellinger 2009).

Komponentti	Biokaasu			Maakaasu
	Biokaasulaitos	Jätevedenpuhdistamo	Kaatopaikka	(Urengoi, Venäjä)
Metaani (%)	60 - 70	55 - 65	45 - 55	98
Hiilidioksidi (%)	30 - 40	35 - 45	30 - 40	0,1
Typpi (%)	<1	<1	5 - 15	0,9
Rikkivedyt (ppm)	10 - 2000	10 - 40	50 - 300	-
-Ei mainittu				

Biokaasua voidaan käyttää sellaisenaan lämmön ja sähköntuotantoon tai raaka-aineena kemikaalien tuotannossa. Puhdistettuna biokaasu voidaan johtaa maakaasuverkkoon ja käyttää polttoaineena kaasuautoissa. Maailmanlaajuisesti suurin osa biokaasusta käytetään sähköntuotantoon, mutta kaasun puhdistus liikennekäyttöön herättää yhä enemmän kiinnostusta öljyn hinnan nousun ja liikenteen hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi asetettujen tavoitteiden vuoksi (Persson ym. 2006, Petersson & Wellinger 2009).

Euroopassa biokaasusta tuotettiin energiaa 5,9 Mtoe (68,6 TWh) vuonna 2007 (kuva 1). Tuotanto kasvoi 20,5 % edelliseen vuoteen verrattuna. Suurimmat tuottajamaat olivat Saksa, Iso-Britannia ja Italia.



- Kaatopaikkakaasu
- Jätevedenpuhdistamoiden biokaasu
- Biokaasu muista raaka-aineista

Kuva 1. Biokaasun primäärienergian tuotanto Euroopan Unionissa 2007 (ktoe) (EurObserv'ER 2008).

Vuonna 2008 Suomessa oli 15 biokaasureaktorilaitosta kaupunkien jätevedenpuhdistamoilla. Teollisuuden jätevesiä käsiteltiin kolmessa biokaasulaitoksessa, joista yhdessä käsiteltiin puunjalostuksen ja kahdessa elintarviketeollisuuden jätevesiä. Maatilakohtaisia biokaasulaitoksia oli toiminnassa kahdeksan. Kiinteitä yhdyskuntajätteitä

käsiteltiin anaerobisesti kolmella biokaasulaitoksella. Näillä 29 reaktorilaitoksella tuotettiin biokaasua yhteensä 29,9 miljoonaa Nm³. Tämän lisäksi biokaasua kerättiin talteen 33 kaatopaikalta 112,2 miljoonaa Nm³. Yhteensä biokaasusta tuotettiin energiaa vuonna 2008 462,2 GWh, josta 405,5 GWh oli lämpöä ja 56,6 GWh oli sähköä (Kuittinen & Huttunen 2009). Biokaasusta tuotetun energian määrä kasvoi noin 9 % vuoteen 2007 verrattuna (Kuittinen ym. 2008). Suomessa biokaasun hyödyntämisaste vuonna 2008 oli 72 %. Hyödyntämätön biokaasu, lähes 173 GWh, poltettiin ylijäämänä soihduissa (Kuittinen & Huttunen 2009).

2.2 Biokaasun käyttö ajoneuvoissa

Puhdistettua biokaasua eli biometaanina polttoaineena käyttävät autot voivat ilman teknisiä muutoksia käyttää myös maakaasua polttoaineenaan (Persson & Wellinger 2006). Biometaanin ominaisuuksiltaan verrattavissa maakaasuun ja niitä voidaan käyttää rinnakkain, koska molempien keskeinen ainesosa on metaani. Olennainen ero biometaanin ja maakaasun välillä on, että biometaanin valmistetaan uusiutuvista energianlähteistä kun taas maakaasu on fossiilinen polttoaine (Gustaffson & Stoor 2008).

Vuonna 2009 maailmassa oli yli 10,5 miljoonaa kaasuautoa ja yli 15 000 kaasuautojen tankkausasemaa (NGVA Europe 2009). Maailmassa on yhteensä yli 600 miljoonaa autoa (Renner 2008). Euroopassa kaasuautoja on yli miljoona (taulukko 2). Kaasuautoja käytetään Euroopan lisäksi muun muassa Aasiassa ja Etelä-Amerikassa, esimerkiksi Pakistanissa oli vuonna 2009 yli 2 miljoonaa kaasuautoa ja Brasiliassakin yli 1,5 miljoonaa (NGVA Europe 2009). Suomessa oli vuonna 2009 16 maakaasun tankkausasemaa. Laukaalla toimii Suomen ainoa biometaanin tankkausasema, josta biometaanin tankataan tällä hetkellä (toukokuu 2010) noin 30 autoon (Gasum Oy 2009b, Rintala 2010).

Taulukko 2. Kaasuautojen ja kaasun tankkausasemien lukumäärät Euroopassa sekä eräissä Euroopan maissa vuonna 2009 (NGVA Europe 2009, Gasum Oy 2009b).

	Suomi	Ruotsi	Saksa	Sveitsi	Ranska	Eurooppa
Kaasuautot (kpl)	543	18 600	83 783	7 122	12 450	1 130 000
Kaasun tankkausasemat (kpl)	17	132	835	113	125	3160

Suurimmaksi osaksi kaasuautojen polttoaineena käytetään maakaasua. Puhdistettua biokaasua käytetään liikennepolttoaineena laajemmassa mittakaavassa muun muassa Ruotsissa, Ranskassa ja Italiassa (Nylund ym. 2009). Ruotsissa biokaasua on puhdistettu liikennepolttoaineeksi 1990-luvulta lähtien, ja Ruotsi onkin liikennebiokaasun käytön kärkimaa Euroopassa. Vuonna 2008 Ruotsissa käytettiin liikennebiokaasua yli 30 miljoonaa Nm³ (Petersson 2009). Ruotsissa liikennebiokaasun käytön yleistymisen johtuu muun muassa jätevedenpuhdistamoiden biokaasuylijäämistä sekä sähkön suhteellisen alhaisesta hinnasta, jonka vuoksi biokaasua ei ole kannattanut käyttää sähkön tuotantoon (Jönsson 2004). Ruotsissa suurimmat liikennebiokaasun käyttäjät ovat linja-autokalustot. Jotkut ruotsalaiset kaupungit ovat vaihtaneet koko linja-autokalustonsa metaanikäyttöisiin (Persson ym. 2007).

Metaania (maa- tai biokaasua) polttoaineenaan käyttävät ajoneuvot ovat yleensä joko mono-fuel, bi-fuel tai dual-fuel -ajoneuvoja, sekä joskus myös FFV (flexifuel) tai hybridiajoneuvoja. Kaasuautojen polttoaine on yleensä joko nesteytettyä tai kompressoitua metaania. Teknisiltä ominaisuuksiltaan kaasuauton moottori voi olla joko otto-, diesel-, wankel-, stirling-, suihku- tai raketimoottori. Myös kaasuturbiini ja polttokenno-

sähkömoottoriyhdistelmä ovat mahdollisia (Lampinen 2008). Auton kaasujärjestelmä koostuu ainakin kaasusäiliöstä, paineensäätimistä ja syöttölaitteistosta (Nylund ym. 2009). Kompressoitu metaani varastoidaan autoon 200-250 baarin paineessa teräksestä tai alumiinikomposiitista valmistetussa säiliössä. (NSCA 2006). Kaasusäiliöstä kaasu annostellaan paineensäätimien ja syöttölaitteiston kautta moottoriin (Nylund ym. 2009). Tieliikenteen lisäksi biokaasua voidaan käyttää myös esimerkiksi raideliikenteessä (Lampinen 2008).

Kaasukäyttöisistä henkilöautoista suurin osa on niin kutsuttuja bi-fuel -autoja, joissa on kaksoispolttoainejärjestelmä. Tällaisissa autoissa on toinen polttoainejärjestelmä metaanille ja toinen nestemäiselle polttoaineelle, esimerkiksi bensiinille. Bi-fuel -autot voivat olosuhteiden mukaan käyttää joko kaasumaista tai nestemäistä polttoainetta, mutta eivät molempia samaan aikaan. Tällöin polttoaineen vaihto tapahtuu automaattisesti tai ohjaamossa olevalla valitsimella (NSCA 2006, Nylund ym. 2009). Metaania käyttävissä bi-fuel autoissa käytetään lähes aina otto-moottoria. BMW toi ensimmäisen bi-fuel henkilöauton markkinoille vuonna 1995 (Lampinen 2008).

Raskaammat kaasukäyttöiset ajoneuvot (linja-autot, kuorma-autot) on yleensä suunniteltu käyttämään pelkästään kaasua polttoaineena. Tällaisia kaasuautoja kutsutaan mono-fuel –autoiksi. Mono-fuel –tekniikkaa käytetään myös biokaasujunissa (NSCA 2006, Lampinen 2008).

Dual-fuel –ajoneuvossa on myös kaksoispolttoainejärjestelmä, mutta kaasumaista ja nestemäistä polttoainetta käytetään yhtä aikaa siten, että kaasumainen polttoaine sytytetään pienellä määrällä nestemäistä polttoainetta. Dual-fuel –ajoneuvossa ei siis voida käyttää pelkästään kaasumaista polttoainetta, vaikka se toimiikin pääasiallisena polttoaineena. Dual-fuel –tekniikkaa käytetään raskaissa ajoneuvoissa, kuten täysperävaunurekoissa (NSCA 2006, Lampinen 2008).

FFV –ajoneuvossa on yksi polttoainejärjestelmä, johon voidaan tankata vähintään kahta eri polttoainetta, esimerkiksi etanolia ja bensiiniä. Hybridiajoneuvossa on vähintään kaksi erilaista voimanlähdettä, yleensä polttomoottori ja sähkömoottori. Mono-fuel, bi-fuel ja dual-fuel –kaasuautoit voivat kaikki lisäksi olla FFV/hybridiajoneuvoja. Bensiiniä tai dieseliä käyttäviä ajoneuvoja voidaan myös konvertoida kaasuautoiksi (Lampinen 2008).

2.3 Biokaasun tuotannon ja liikennepolttoainekäytön ympäristönäkökohdat

Biokaasun liikennepolttoainekäytön aiheuttamia suoria ympäristövaikutuksia ovat autojen vähentyneet hiilidioksidi-, pienhiukkas-, typenoksidi- ja ei-metaaniset hiilivety päästöt, kun fossiilisia polttoaineita korvataan biokaasulla (Börjesson & Mattiasson 2008). Ajoneuvokäytössä metaani palaa puhtaammin kuin nestemäiset polttoaineet, joten palamisesta aiheutuvat päästöt ovat pienempiä (Linné ym. 2005). Käytettäessä puhdistettua biokaasua polttoaineena hiilidioksidipäästöt ovat käytännössä olemattomat, sillä biokaasun palaessa muodostuvat hiilidioksidipäästöt ovat osa hiilen luonnollista kiertoa. Myös pienhiukkas-, typen oksidi- ja ei-metaaniset hiilivety päästöt vähenevät huomattavasti (taulukko 3). Lisäksi biokaasuautojen melu- ja hajuhaitat ovat pienempiä kuin bensiini- ja dieselautoilla. Ympäristövaikutusten lisäksi biokaasua pidetään hyvänä liikennepolttoaineena ihmisten terveyden kannalta partikkeli- ja typenoksidipäästöjen vähentyessä (Rutledge 2005, Persson ym. 2006, Persson ym. 2007).

Taulukko 3. Tyypilliset päästövähennykset siirryttäessä käyttämään puhdistettua biokaasua liikennepolttoaineena bensiinin ja dieselin tilalla (Rutledge 2005).

Päästölaji	Bensiinistä biokaasuun	Dieselistä biokaasuun
Typen oksidit NO _x (%)	90	75
Ei-metaaniset hiilivedyt (NMHC) (%)	95	60
Pienhiukkaset (PM) (%)	60	85

Polttoaineen elinkaaren aikaiset kasvihuonekaasupäästöt riippuvat kaasuautojen bensiini- ja dieselautoja pienempien päästöjen lisäksi myös biokaasun tuotantoprosessin aikana aiheutuvista epäsuorista ympäristövaikutuksista. Suurimpaan elinkaaren aikaiseen päästövähennykseen päästään kun biokaasu valmistetaan lannasta, koska käsittelemätön lanta vapauttaa merkittäviä määriä metaania ilmakehään. Metaani on yli 20 kertaa voimakkaampi kasvihuonekaasu kuin hiilidioksidi sadan vuoden tarkastelujaksolla. Lyhyemmällä tarkastelujaksolla metaanin vaikutus on vieläkin suurempi, koska se säilyy ilmakehässä hiilidioksidia pidempään (NSCA 2006, IPCC 2007). Tästä syystä metaanin pääsy ilmakehään on erityisen haitallista. Kun lantaa käytetään biokaasun valmistamiseen myös ammoniakki- ja haihtuvien orgaanisten yhdisteiden (VOC) pääsy ilmaan vähenee, mikä parantaa ilman laatua ja vähentää karjataloudesta aiheutuvia hajuhaittoja (Rutledge 2005).

Maatalouden sivutuotteiden kuten viljelykasvien jäännösten käyttäminen biokaasun tuotantoon vähentää ravinteiden pääsyä ympäristöön viljelyskauden ulkopuolella, mikä vähentää esimerkiksi vesistöjen rehevöitymistä. Mineraalilannoitteiden tarvetta maataloudessa voidaan myös vähentää käyttämällä biokaasun tuotannossa syntyvää käsittelyjäännöstä lannoitteena (Börjesson & Mattiasson 2008). Muun orgaanisen jätteen anaerobisella käsittelyllä voidaan estää jätteen kompostointiprosessin aiheuttamien ammoniakki-, typenoksi- ja metaanipäästöjen muodostuminen (Börjesson & Berglund 2007).

Edellä mainitut biokaasun liikennepolttoainekäytön epäsuorat ympäristövaikutukset voivat olla jopa suurempia kuin suorat, fossiilisten polttoaineiden korvaamisesta aiheutuvat ympäristövaikutukset. Epäsuoria ympäristövaikutuksia harvoin otetaan huomioon kun biokaasun tuotantoa ja liikennepolttoainekäyttöä tarkastellaan ympäristön kannalta. Biokaasujärjestelmien ympäristövaikutukset voivat kuitenkin vaihdella huomattavasti raaka-aineen, reaktoritekniikan, biokaasun käytön ja käsittelyjäännöksen ominaisuuksien mukaan. Lisäksi kokonaisvaikutukset ympäristöön riippuvat suuresti siitä mihin biokaasun tuotantoa ja käyttöä verrataan. Toisin sanoen miten biokaasuntuotantoon käytettävä orgaaninen aines, esimerkiksi lanta tai jätevedenpuhdistamoliete, muuten käsiteltäisiin ja mitä energianlähteitä tuotettu biokaasu korvaa (Börjesson & Berglund 2007).

Biokaasun puhdistus liikennepolttoaineeksi voi myös aiheuttaa metaanipäästöjä. Laitosvalmistajien mukaan yleisimmin käytettyjen biokaasun puhdistusmenetelmien metaanihävikki on noin 2 % raakabiokaasun metaanipitoisuudesta. Metaanipäästöjen määrä voi johtua puhdistusmenetelmästä, vaaditusta metaanipitoisuudesta puhdistetussa kaasussa tai satunnaisista kontrolloimattomista vuodoista (Persson 2003, Börjesson & Berglund 2007). Biokaasun tuotantoprosesseja kehittäessä erityistä huomiota tulisi asettaa metaanipäästöjen minimoimiselle (Börjesson & Mattiasson 2008).

2.4 Biokaasun liikennepolttoainekäyttöön vaikuttavat tavoitteet ja lainsäädäntö

Vuonna 2009 voimaan tulleen EU:n uusiutuvia energiamuotoja koskevan tavoitteen mukaan uusiutuvista energianlähteistä tuotettujen polttoaineiden osuus tulisi olla 10 % bensiinin ja dieselin kokonaiskulutuksesta liikenteessä vuoteen 2020 mennessä (Directive 2009/28/EC). Tällä hetkellä EU:n liikenne on lähes täysin riippuvainen öljystä, josta suurin osa tuodaan unionin ulkopuolelta. Liikenteessä käytettävän polttoaineyhdistelmän muuttaminen on tärkeää kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi, mutta myös omavaraisuusasteen lisäämiseksi (Euroopan yhteisöjen komissio 2007).

EU erityisesti kannustaa sellaisten uusiutuvien polttoaineiden kehitystä, jotka eniten edistävät kasvihuonekaasusäästöihin ja toimitusvarmuuteen liittyvien unionin tavoitteiden saavuttamista. Lisäksi EU kannustaa jäsenmaita asettamaan verohelpotuksia uusiutuville polttoaineille niiden käytön lisäämiseksi (Euroopan yhteisöjen komissio 2007). Biokaasusta on erikseen mainittu, että sen käytöllä sekä energiantuotannossa että liikennepolttoaineena on merkittäviä ympäristöetuja, sillä käyttämällä biokaasua fossiilisten energianlähteiden sijaan voidaan vähentää kasvihuonekaasupäästöjä (Directive 2009/28/EC).

Biokaasun käyttö liikennepolttoaineena on kuitenkin ollut vähäistä verrattuna ensimmäisen sukupolven biodieseliin ja bioetanoliiin. Yhteensä uusiutuvien polttoaineiden markkinaosuus EU:ssa oli yhden prosentin luokkaa vuonna 2005 (Euroopan yhteisöjen komissio 2007). Trendsetterin (2003) mukaan esteenä biokaasun käytön lisääntymiselle on ollut säännösten ja lakien puute EU-tasolla. Niissä Euroopan maissa, jotka ovat kasvattaneet biokaasun osuutta liikenteessä käytetyistä polttoaineista, kuten Sveitsissä ja Ruotsissa, liikennebiokaasu on verovapaata (Hagen ym. 2001).

Suomessa metaanipohjaiset liikennepolttoaineet ovat vapaita polttoaineverosta, jota normaalisti maksetaan bensiinistä, dieselistä ja kevyestä ja raskaasta polttoöljystä. Liikennebiokaasusta, kuten muistakin polttoaineista, on kuitenkin maksettava arvonlisävero (Laki ajoneuvoverolain muuttamisesta 21.12.2007/1311, Nylund ym. 2009).

Henkilöauton omistamisesta ja käytöstä on Suomessa maksettava sekä autoveroa että ajoneuvoveroa. Lisäksi auton myyntihintaan sisältyy arvonlisävero. Henkilöautojen ja pakettiautojen autovero määräytyy ajoneuvon hiilidioksidipäästöjen perusteella, mikä suosii vähäpäästöisiä ajoneuvoja, kuten kaasuautoja (Nylund ym. 2009).

Vuosittain maksettava ajoneuvovero koostuu perusverosta ja käyttövoimaverosta. Henkilöautojen perusvero muuttuu hiilidioksidipäästösidonnaiseksi autoveron tapaan vuonna 2010. Perusvero on määräytynyt toistaiseksi käyttöönottovuoden mukaan. Käyttövoimaveroa maksetaan yleensä kaikista muista paitsi bensiiniautoista (Lampinen 2008, Nylund ym. 2009). Vuoteen 2004 asti metaanista koostuvaa polttoainetta käyttävistä autoista piti maksaa käyttövoimaveron, mikä käytännössä esti kaasukäyttöisten autojen lisääntymisen. Vuoden 2004 alusta voimaantulleen uuden ajoneuvoverolain mukaan metaanista koostuvaa polttoainetta, mukaan lukien liikennebiokaasua, käyttävistä henkilö- ja pakettiautoista ei tarvitse maksaa käyttövoimaveron, joten niitä verotetaan kuin bensiiniautoja (Kauppa- ja teollisuusministeriö 2006, Laki ajoneuvoverolain muuttamisesta 21.12.2007/1311). Dual fuel -ajoneuvoista maksetaan kuitenkin edelleen käyttövoimaveron, koska ne eivät pysty käyttämään pelkästään metaania polttoaineena, vaan dieseliä tarvitaan aina metaanin sytytykseen (Lampinen 2008).

Metaanipohjaista polttoainetta käyttävät henkilö-, paketti-, kuorma- ja linja-autot ovat vuodesta 2004 lähtien olleet vapaita polttoainemaksusta. Polttoainemaksua maksetaan ajoneuvosta, jossa käytetään bensiiniä (jos kyseessä on bensiiniajoneuvo) tai dieseliä (jos

kyseessä on dieselajoneuvo) lievemmin verotettua polttoainetta, ellei käytettävää polttoainetta ole erikseen vapautettu polttoainemaksusta (Laki polttoainemaksusta 30.12.2003/1280, Nylund ym. 2009).

2.5 Laatuvaatimukset ajoneuvokäytössä ja maakaasuverkossa

Maakaasun käyttöön liikennepolttoaineena on olemassa kansainvälinen standardi ISO 15403 ”Natural Gas –Designation of the quality of natural gas for use as a compressed fuel for vehicles” (Nylund ym. 2009). Biokaasun käytölle liikennepolttoaineena ei vielä ole yhteistä laatustandardia. Ainoastaan Ruotsissa biokaasun ajoneuvokäyttöä varten on laadittu maakohtainen laatustandardi (taulukko 4). Samaa standardia käytetään myös kun biokaasua syötetään maakaasuverkkoon. Kaliforniassa, Yhdysvalloissa, liikennebiokaasua koskevat samat laadulliset vaatimukset kuin liikennepolttoaineena käytettävää maakaasua (Rutledge 2005, Persson & Wellinger 2006, Persson ym. 2006, Petersson & Wellinger 2009).

Euroopassa biokaasua on voitu syöttää maakaasuverkkoon EU:n kaasumarkkinadirektiivin astuttua voimaan vuonna 2003. Direktiivin tarkoitus on taata kaikille kaasuntuottajille samat oikeudet kaasun jakeluun, ja edistää erityisesti uusiutuvaan energiaan investoivien pientuottajien kaasun pääsyä markkinoille. Direktiivin mukaan biokaasua voidaan syöttää maakaasuverkkoon, kunhan se täyttää sille asetetut laatuvaatimukset sekä tekniset ja turvallisuusvaatimukset (Directive 2003/55/EC). Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että biokaasu on puhdistettava hiilidioksidista ja haitta-aineista.

Biokaasun johtamisella maakaasuverkkoon on etuja kun biokaasua käytetään liikennepolttoaineena. Biokaasun jakelu maakaasuverkon kautta mahdollistaa saatavilla olevan tuotantokapasiteetin täyden hyödyntämisen. Lisäksi biokaasun jakeluinfrastruktuurin kasvattaminen on mahdollista nopeammin, kun maakaasun jakeluasemia käytetään myös biokaasun jakeluun. Maakaasua voidaan myös alussa käyttää biokaasun rinnalla varmistamaan kaasukäyttöisten ajoneuvojen polttoaineen saatavuus (Linné ym. 2005).

Maakohtaisia standardeja biokaasun syöttämiselle maakaasuverkkoon on esimerkiksi Ranskassa, Sveitsissä ja Saksassa (taulukko 4). Ranskassa ja Saksassa on erikseen laatuvaatimukset matalan lämpöarvon (L) biokaasulle ja parempilaatuiselle, korkean lämpöarvon (H) biokaasulle. Myös Sveitsissä käytetään kahta eri standardia. Toinen on kaasun rajoitettuun syöttöön maakaasuverkkoon (taulukossa A), ja toinen rajoittamattomaan syöttöön (taulukossa B). Biokaasun rajoittamattomaan syöttöä koskevat laatuvaatimukset ovat tiukemmat, jotta maakaasuverkon kaasun energiasisältö ei alenisi (Rutledge 2005, Persson & Wellinger 2006, Persson ym. 2006, Petersson & Wellinger 2009).

Taulukko 4. Eräiden maiden laatuvaatimuksia biokaasun käyttöön liikennepolttoaineena (Ruotsi, Yhdysvallat) ja biokaasun syöttämiseen maakaasuverkkoon (Ruotsi, Sveitsi, Saksa, Ranska) (Rutledge 2005, Persson & Wellinger 2006, Persson ym. 2006, Petersson 2008, Petersson & Wellinger 2009).

Parametri	Yksikkö	Ruotsi	Sveitsi		Saksa		Ranska		Yhdysvallat (Kalifornia)
			A	B	L	H	L	H	
W_{alempi}	MJ/Nm ³	43,9-47,3	-	-	-	-	-	-	-
W_{ylempi}	MJ/Nm ³	-	-	-	37,8-46,8	46,1-56,5	42,48-46,8	48,24-56,52	-
Metaania	vol-%	95-99	>50	>96	-	-	-	-	minimi 88
Hiilidioksidia	vol-%	-	<6	<6	<6	<6	<2	<2	maksimi 1
Happea	vol-%	-	<0,5	<0,5	<3	<3	-	-	-
	ppm	-	-	-	-	-	<100	<100	-
Vetyä	vol-%	-	<5	<5	-	-	<6	<6	-
Vettä	mg/Nm ³	<32	-	-	-	-	-	-	-
CO ₂ +O ₂ +N ₂	vol-%	<5	-	-	-	-	-	-	1,5-4,5
Kastepiste	°C	<t ¹ -5	-	-	<t ²	<t ²	<-5	<-5	-
Suhteellinen kosteus	phi	-	<60 %	<60 %	-	-	-	-	-
Rikkiä yht.	mg/Nm ³	<23	<30	<30	<30	<30	<100 ³	<75 ⁴	-
	ppm	-	-	-	-	-	-	-	16
Rikkivetyä	mg/Nm ³	-	<5	<5	-	-	-	-	-
Typpiyhdisteet (laskettu NH ₃ -ksi)	mg/Nm ³	<20	-	-	-	-	-	-	-
Hiukkaset, halkaisija max	µm	<1	-	-	-	-	-	-	-
Pölyä	mg/Nm ³	-	-	-	-	-	<5	<5	-
Elohopeaa	mg/Nm ³	-	-	-	-	-	<10 ⁵	<50 ⁶	-
Klooria	mg/Nm ³	-	-	-	-	-	<1	<1	-
Fluoria	mg/Nm ³	-	-	-	-	-	<10	<10	-
Hiilimonoksidi	vol-%	-	-	-	-	-	<2	<2	-

- Ei laatuvaatimusta, ¹Ympäristön lämpötila, ²Maanpinnan lämpötila, ³Kertapitoisuus,

⁴Keskiarvopitoisuus, ⁵Maakaasu, ⁶Nestemäiselle maakaasulle

Wobbeluku (W_{alempi} , W_{ylempi}) on kaasun hyödyntämisessä tärkeä tekijä, sen avulla voidaan verrata erilaisten kaasukoostumusten palamiseroja. Wobbeluku ilmaisee kaasun lämpöarvon ja suhteellisen tiheyden suhteen. Kaasuilla tai kaasujen sekoituksilla joilla on sama Wobbeluku on myös samat palamisominaisuudet (Hagen ym. 2001).

2.6 Biokaasun puhdistusmenetelmiä

Raaka biokaasu on puhdistettava ennen kuin sitä voidaan käyttää polttoaineena kaasuautoissa (taulukko 5). Käytännössä tämä tarkoittaa ainakin hiilidioksidin poistamista tai määrän vähentämistä sallitulle tasolle. Biokaasun ominaisuuksista riippuen myös muiden kaasun komponenttien, kuten rikkivedyn, ammoniakkin, partikkeleiden ja veden poistaminen voi olla tarpeen. Biokaasun puhdistus suoritetaan yleensä kahdessa vaiheessa. Pääpaino puhdistusprosessissa on hiilidioksidin poistamisessa, jolloin yleensä myös muita epäpuhtauksia poistuu biokaasusta. Jos muiden epäpuhtauksien kuten rikkivedyn erillinen poistaminen on tarpeen, se tehdään yleensä ennen hiilidioksidin poistamista (NSCA 2006).

Kaatopaikkakaasun puhdistaminen liikennepolttoaineeksi on usein hankalampaa kuin kontrolloiduissa biokaasulaitoksissa tuotetun biokaasun, koska kaatopaikkakaasu sisältää yleensä enemmän epäpuhtauksia, kuten rikkivetyä ja halogenoituja hiilivetyjä. Tämän takia kaatopaikkakaasun puhdistuslaitokset voidaan joutua suunnittelemaan ja rakentamaan monimutkaisemmiksi, esimerkiksi yhdistämällä eri biokaasun puhdistusmenetelmiä. Lisäksi kaatopaikkakaasua puhdistettaessa on huomioitava, että raakabiokaasun ominaisuudet todennäköisesti vaihtelevat johtuen kaatopaikalle sijoitetun jätteen ominaisuuksien vaihtelusta (Persson ym. 2007).

Taulukko 5. Esimerkkejä biokaasua liikennepolttoaineeksi puhdistavista laitoksista.

Laitos	Biokaasun tuotanto	Biometaanin CH ₄ pitoisuus (%)	Biometaanin muut yhdisteet	CO ₂ puhdistusmenetelmä	H ₂ S puhdistusmenetelmä	Kapasiteetti (Nm ³ biokaasua/h)	Tuotetun biometaanin energia (GWh/a)*	Ajoneuvoja	Käyttönottovuosi	Lähde
Lille, Ranska	Jätevedenpuhdistamo	97	2 ppm H ₂ S 3 ppm H ₂ O 1,6 % CO ₂	Vesiabsorptio	Vesiabsorptio	100	5,1	124 linja-autoa	1993	1,2,4,5
Rooma, Italia	Kaatopaikka	97-99	1-3 % CO ₂ , 1-10 ppm H ₂ S 1-3 ppm H ₂ O	Vesiabsorptio, PSA	Absorptio rautaoksidilla	900-1000	46,0-51,1	34 autoa	1995	5
Reykjavik, Islanti	Kaatopaikka	-	-	Vesiabsorptio	Vesiabsorptio	700	35,8	44 autoa	2005	1,2,3
Kobe, Japani	Jätevedenpuhdistamo	97	-	Vesiabsorptio	Vesiabsorptio	100	5,1	-	2004	1,2,3
Tukholma (Bromma), Ruotsi	Jätevedenpuhdistamo	97	2 % CO ₂ 1 % N ₂	PSA	Aktiivihiili	2*300 600	30,7 30,7	n. 500 autoa	2000	1,2,4,5
Uppsala, Ruotsi	Ruokateollisuuden jätteet, lanta, jätevedenpuhdistamo	97	-	Vesiabsorptio	Vesiabsorptio	200 400	10,2 20,4	n. 50 linja-autoa	1997 2002	1,2,4
Los Angeles (CA), USA	Kaatopaikka	96	-	Membraanierotus	Aktiivihiili	2600	132,9	-	1993	1,2,3

- Ei tietoja saatavana, *Tekijän laskema

Lähteet: 1 Persson & Wellinger 2006, 2 Persson ym 2006, 3 Petersson 2009, 4 Trendsetter 2003, 5 Persson ym. 2007

2.6.1 Hiilidioksidin poistaminen biokaasusta

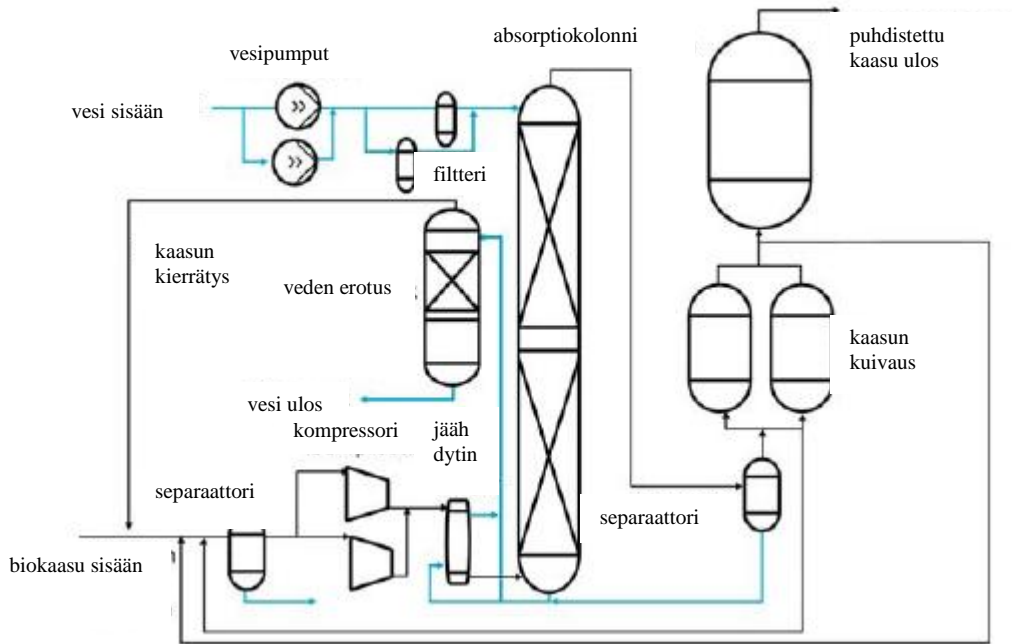
Hiilidioksidin poistaminen nostaa kaasun energiasisältöä ja lisää kaasun laadun tasaisuutta. Korkeampi lämpöarvo kaasussa myös pidentää ajosädetä suhteessa kaasun tilavuuteen. Tällä hetkellä käytetyimmät menetelmät hiilidioksidin poistoon ovat vesiabsorptio ja paineenvaihteluadsorptio. Muita tekniikoita hiilidioksidin poistamiseen ovat absorptio orgaanisilla liuottimilla, membraanisuodatus ja kryotekniikka (Persson & Wellinger 2006).

Vesiabsorptio

Hiilidioksidi ja rikkivety voidaan poistaa biokaasusta vesiabsorption avulla. Sekä hiilidioksidi että rikkivety liukenevat paremmin veteen kuin metaani. Vesiabsorptiossa kompressoitu biokaasu johdetaan absorptiokolonniin sen alaosasta ja paineistettu vesi yläosasta (kuva 2). Kolonnin sisäpuolella on yleensä täytekappaleita, jotka estävät kaasun ja vesivirtojen eriytymisen. Hiilidioksidi liukenee veteen, jolloin biokaasun metaanisisältö kasvaa. Puhdistettu biokaasu johdetaan ulos kolonnin yläosasta ja hiilidioksidia sisältävä vesi sen alaosasta. Tämän jälkeen biokaasu kuivataan kosteuden poistamiseksi (Persson ym. 2006, Petersson & Wellinger 2009).

Jos vettä ei regeneroida, se käytetään absorptioprosessissa kerran, jonka jälkeen se korvataan uudella vedellä. Vesi voidaan regeneroida painetta laskemalla, jolloin myös veteen mahdollisesti pieninä määrinä liuennut metaani on mahdollista kerätä talteen ja kierrättää takaisin prosessiin. Hiilidioksidi voidaan erottaa vedestä paineen laskemisen lisäksi myös johtamalla siihen ilmaa. Regeneroinnin jälkeen vesi voidaan käyttää uudelleen prosessissa (Jönsson ym. 2003, Natural Resources Canada 2007, Petersson & Wellinger 2009). Hiilidioksidi ja rikkivety eivät liukene veteen yhtä hyvin kuin orgaanisiin liuottimiin, joten vedenkulutus suhteessa puhdistuskapasiteettiin on vesiabsorptiossa suhteellisen korkea, erityisesti jos biokaasussa on runsaasti rikkivetyä (Petersson & Wellinger 2009). Vesiabsorptiolaitteistoissa ongelmia voi aiheuttaa orgaanisen kasvuston aiheuttama absorptiokolonnin täytekappaleiden tukkeutuminen (Persson ym. 2006).

Vesiabsorptio on yksinkertainen, melko edullinen ja vakiintunut menetelmä hiilidioksidin poistamiseen biokaasusta. Lisäksi hyvin hallitussa prosessissa metaanihävikki voi olla pienempi kuin 2 %. Jos veden regenerointia tarvitaan, menetelmän energiankulutus kasvaa. Vesiabsorptio on erityisen kannattavaa kohteissa, joissa vettä on tarjolla edullisesti eikä vettä tarvitse regeneroida, kuten jätevedenpuhdistamoilla (Natural Resources Canada 2007). Vesiabsorptio on käytetyin biokaasunpuhdistusmenetelmä ja puhdistuslaitteistoja on kaupallisesti saatavilla eri kapasiteeteille monelta eri valmistajalta (Petersson & Wellinger 2009).



Kuva 2. Biokaasun puhdistaminen vesiabsorptiolla ilman veden regenerointia (Persson ym. 2006, muokattu).

Absorptio orgaanisilla liuottimilla

Hiilidioksidin erottamiseen biokaasusta voidaan käyttää myös orgaanisia liuottimia, kuten polyetyleeniglykolia, tällöin kyse on fysikaalisesta absorptiosta. Selexol ja Genosorb ovat eräitä polyetyleeniglykolin kauppanimiä. Prosessi on samanlainen kuin vesiabsorptiossa, mutta hiilidioksidi ja rikkivety liukenevat paremmin orgaanisiin liuottimiin kuin veteen. Tämän vuoksi prosessi kuluttaa vähemmän absorptioliuosta ja energiaa. Orgaanisen liuottimen regenerointi rikkivedystä vaatii kuitenkin paljon energiaa, joten on suositeltavaa poistaa rikkivety biokaasusta ennen absorptiota. Orgaanisia liuottimia käyttämällä on mahdollista erottaa biokaasusta samalla myös vesi, typpi, siloksaanit ja halogenoidut hiilivedyt, joita voi esiintyä erityisesti kaatopaikkakaasussa. Polyetyleeniglykoliliuos voidaan regeneroida samaan tapaan kuin vesiabsorptiossa käytetty vesi. (Persson ym. 2006, Natural Resources Canada 2007, Petersson & Wellinger 2009).

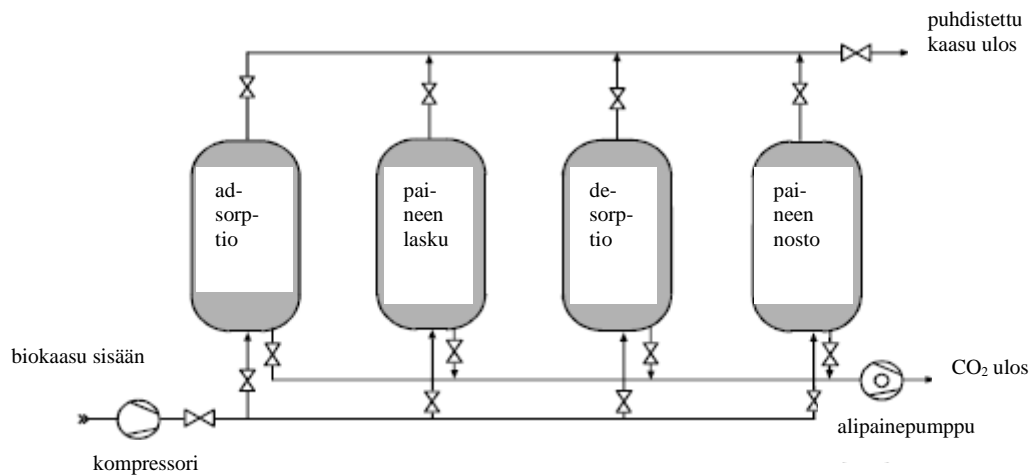
Muita orgaanisia liuottimia ovat alkoholiamiinit kuten monoetanoliamiini (MEA) ja metyyliidietanoliamiini (MDEA). Kyseessä on kemiallinen absorptio, joten hiilidioksidi reagoi kemiallisesti liuottimen sisältämien yhdisteiden kanssa. Reaktio on selektiivinen, joten lähes kaikki hiilidioksidi voidaan erottaa biokaasusta, ja metaanihävikki on pieni, jopa <math><0,1\ \%\</math>. Alkoholiamiineita käytettäessä rikkivety poistetaan yleensä ennen absorptiota. Kemikaali regeneroidaan käänteisellä kemiallisella reaktiolla yleensä lämmön tai alipaineen vaikutuksesta, mikä vaatii suhteellisen paljon energiaa (Persson ym. 2006, Petersson & Wellinger 2009).

Paineenvaihteluadsorptio (PSA)

Hiilidioksidi voidaan poistaa biokaasusta johtamalla kaasu esimerkiksi aktiivihiilen tai molekyyliuseulan läpi, jolloin hiilidioksidi kiinnittyy adsorbentin pinnalle, ja puhdistettu kaasu kerätään talteen. Paineenvaihteluadsorptiossa adsorptio tapahtuu korkeassa paineessa ja adsorbentin regenerointi eli desorptio tapahtuu painetta laskemalla. Raaka biokaasu johdetaan paineistettuun kolonniin sen alaosasta, hiilidioksidi ja muut epäpuhtaudet kiinnittyvät adsorptiomateriaalin pinnalle ja puhdistettu kaasu poistuu kolonnin yläosasta (kuva 3). Ennen kuin adsorptiomateriaali on täysin kyllästynyt, se regeneroidaan ja

biokaasu johdetaan seuraavaan kolonniin. PSA-prosessissa on yleensä neljä tai useampia kolonneja rinnakkain. Ainakin yksi kolonni on adsorptiovaiheessa, yksi desorptiovaiheessa, ja kahdessa painetta joko lasketaan tai nostetaan. Puhdistettu kaasu sisältää >97 % metaania. Adsorptiomateriaalin regeneraation aikana painetta lasketaan vaiheittain. Jos paineenlaskuvaiheessa vapautunut kaasu sisältää hiilidioksidin lisäksi metaania, se kierrätetään takaisin prosessiin, jotta kaikki metaani saadaan talteen. Lopuksi biokaasusta erotettu hiilidioksidi johdetaan ilmakehään, jolloin myös pieniä määriä metaania voi päästä hiilidioksidin mukana ilmakehään (Jönsson ym. 2003, Persson ym. 2006, Petersson & Wellinger 2009).

PSA-prosessilla biokaasusta on mahdollista poistaa hiilidioksidin lisäksi vesi, partikkelit, rikkivety, siloksaanit ja halogenoidut yhdisteet. Biokaasun ominaisuuksista riippuen voi kuitenkin olla kannattavampaa poistaa osa epäpuhtauksista ennen PSA-prosessia, koska esimerkiksi rikkivety voi kyllästyä adsorptiomateriaalin ja kosteus vahingoittaa sen koostumusta (Natural Resources Canada 2007).



Kuva 3. Paineenvaihteluadsorptiossa biokaasun sisältämä hiilidioksidi kiinnittyy korkeassa paineessa adsorptiomateriaalin pintaan. Adsorptiomateriaali regeneroidaan painetta laskemalla (Persson ym. 2006, muokattu).

Membraanisuodatus

Membraanisuodatus perustuu siihen, että erikokoisilla molekyyileillä on erilainen läpäisevyys suhteessa membraaniin. Raaka biokaasu kulkee membraanin toisella puolella. Biokaasun sisältämä hiilidioksidi läpäisee membraanin, kun taas metaani pysyy membraanin toisella puolella. Membraanisuodatus on joko erotusprosessi, jossa membraanin kummallakin puolella on kaasufaasi, tai absorptioprosessi, jolloin membraanin toisella puolella on nestettä joka absorboi membraanin läpäisevät yhdisteet. Membraanisuodatuksella voidaan erottaa biokaasusta hiilidioksidia ja rikkivetyä. Membraanin laadun ja kaasun laadun lisäksi prosessiin vaikuttavat paine sekä kaasun lämpötila. Membraanit toimivat joko >20 baarin paineessa tai 8-10 baarin paineessa (Jönsson ym. 2003, Persson ym. 2006, Petersson & Wellinger 2009). Membraanisuodatuksella on päästy 91-94 % metaanipitoisuuksiin biokaasussa Membraanisuodatuksen tehokkuutta voidaan parantaa kasvattamalla membraanin kokoa tai käyttämällä useita membraaneja sarjassa (Harasimovicz ym. 2007, Petersson & Wellinger 2009). Biokaasu kuivataan ja kompressoidaan, ja yleensä rikkivety poistetaan biokaasusta aktiivihieillä ennen membraanisuodatusta. Membraanisuodatusta on käytetty erityisesti kaatopaikkakaasun puhdistuksessa (Jönsson ym. 2003, Persson ym. 2006, Petersson & Wellinger 2009).

Kryotekniikka

Hiilidioksidi voidaan erottaa biokaasusta jäädyttämällä kaasuseosta korotetussa paineessa, koska metaanin kiehumispiste on -160°C ja hiilidioksidin -78°C . Raaka biokaasu siis jäädytetään kunnes hiilidioksidi tiivistyy. Prosessissa erotettu nestemäinen hiilidioksidi voidaan käyttää muissa käyttökohteissa. Metaani voidaan poistaa prosessista joko kaasuna tai nesteenä. Typen kiehumispiste on vielä matalampi kuin metaanilla, joten metaanin tiivistyessä myös typpi voidaan erottaa siitä. Tämä on etu etenkin kaatopaikkakaasua puhdistettaessa, koska se sisältää usein typpeä. Jotta jäätymiseltä ja muilta ongelmilta prosessissa vältyttäisiin, vesi ja rikkivety tulee poistaa biokaasusta ennen sen jäädyttämistä (Persson ym. 2006, Petersson & Wellinger 2009). Kryotekniikalla voidaan poistaa biokaasusta myös siloksaaneja. Jäädyttämällä biokaasu -25°C lämpötilaan siloksaaneista on pystytty poistamaan 26 % ja jopa 99 % kun biokaasu on jäädytetty -70°C lämpötilaan (Environment Agency 2004). Kryotekniikka on suhteellisen uusi menetelmä biokaasun puhdistukseen. Vuonna 2006 Yhdysvaltoihin Kaliforniaan valmistui ensimmäinen kryotekniikalla kaatopaikkakaasua puhdistava kaupallisen kokoluokan laitos. Vuoden 2009 alusta Alankomaissa on toiminut kryotekniikkaa hyödyntävä pilottilaitos, jonka lopputuote on nestemäinen metaani (Persson ym. 2006, Petersson & Wellinger 2009).

2.6.2 Rikkivedyn poistaminen biokaasusta

Rikkivety on yleisin rikkiyhdiste biokaasussa, ja se reagoi helposti metallien kanssa. Rikkivety on poistettava biokaasusta, jotta vältytään korroosiolta putkistoissa ja muussa laitteistossa. Polttomoottorit toimivat parhaiten, kun rikkivetyä on alle 100 ppm biokaasussa. Rikkivetyä on aina biokaasussa, vaikka määrä vaihtelee biokaasun raaka-aineen mukaan. Rikkivetyä on erityisesti kaatopaikkakaasussa ja eläinten lannasta tuotetussa biokaasussa (Persson ym. 2006, Natural Resources Canada 2007). Rikkivety voidaan poistaa joko saostamalla se reaktorissa tai poistamalla se kaasusta joko erikseen tai hiilidioksidin poistamisen yhteydessä (Petersson & Wellinger 2009).

Biologinen rikinpoisto

Thiobacillus -ryhmään kuuluvia mikro-organismeja voidaan käyttää hapettamaan rikkivetyä rikiksi ja rikkidioksidiksi. Niitä on yleisesti biokaasun raaka-aineissa, eikä niitä tarvitse erityisesti lisätä. Lisäksi ne käyttävät hiilidioksidia hiilen lähteenään. Yksinkertaisimmillaan biokaasureaktoriin lisätään ilmaa tai happea noin 2-6 % biokaasusta. Biologisella rikinpoistolla rikkivedyn määrä voi vähentyä 95 %, jopa alemmaksi kuin 50 ppm. Prosessiin vaikuttavia tekijöitä ovat lämpötila, reaktioaika ja lisätyn ilman määrä ja paikka. Lisättäessä ilmaa biokaasureaktoriin tulee välttää yliannostusta, koska metaani on räjähdysherkkä 5-15 % pitoisuuksina ilmakehässä. Lisätty happi tulee myöhemmin poistaa biokaasusta jotta sitä voitaisiin käyttää liikennepolttoaineena. Rikkivetyä voidaan poistaa biologisesti myös suodattimilla, joihin mikro-organismit ovat kiinnittyneinä. Tällöin reaktorista poistuva biokaasu johdetaan suodattimen läpi vastavirtaan ravinteita sisältävän veden kanssa (Rutledge 2005, Persson ym. 2006, Natural Resources Canada 2007, Petersson & Wellinger 2009).

Rautakloridin lisäys

Biokaasun sisältämän rikkivedyn määrää voidaan vähentää myös lisäämällä biokaasureaktoriin rautakloridia (FeCl_3). Tällöin rautaionit (Fe^{2+}) reagoivat sulfidi-ionien (S^{2-}) kanssa muodostaen lähes liukenematonta rautasulfidia (FeS), joka voidaan poistaa

reaktorista. Rautakloridia lisäämällä rikkivedyn pitoisuus voidaan laskea 100-150 ppm:iin (Persson ym. 2006, Petersson & Wellinger 2009).

Aktiivihiilisuodatus

Rikkivety voidaan adsorboida aktiivihiileen. Reaktion nopeuttamiseksi ja kapasiteetin kasvattamiseksi kyllästettyä aktiivihiiltä voidaan käyttää rikkivedyn muuttamiseen katalyyttisesti rikiksi ja vedeksi. Tällöin aktiivihiili on kyllästetty esimerkiksi kalsiumkarbonaatilla (K_2CO_3). Rikillä täytynyt aktiivihiili voidaan joko regeneroida tai vaihtaa uuteen. Rikkivedyn erotusta kyllästetyllä aktiivihiilellä käytetään usein ennen hiilidioksidin poistamista PSA-prosessilla (Persson ym. 2006).

Rautaoksidin/rautahydroksidin lisäys

Rikkivetyä voidaan poistaa biokaasusta johtamalla kaasu rautaoksidia (Fe_2O_3) tai rautahydroksidia ($Fe(OH)_3$) sisältävän materiaalin läpi, jolloin rikkivety reagoi rautaoksidin tai rautahydroksidin kanssa muodostaen rautasulfidia (FeS). Materiaali voi olla esimerkiksi hapetettua teräsvillaa tai puulastuja jotka on päällystetty rautaoksidilla tai rautahydroksidilla. Kun materiaali on kyllästynyt, se voidaan regeneroida tai vaihtaa. Regenerointi suoritetaan ilmalla hapettamalla ja rautaoksidi tai rautahydroksidi ja rikki voidaan ottaa talteen. (Persson ym. 2006).

Natriumhydroksidipesu

Natriumhydroksidipesussa vesiliuoksen sisältämä natriumhydroksidi reagoi biokaasussa olevan rikkivedyn kanssa muodostaen natriumsulfidia (Na_2S) tai natriumvety sulfidia ($NaHS$). Molemmat ovat liukenemattomia suoloja, joten regenerointi ei ole mahdollista (Persson ym. 2006). Natriumhydroksidipesu on vanhin menetelmä rikkivedyn poistoon eikä sitä juuri enää käytetä, koska lopputuotteen syövyttävyyden vuoksi prosessilla on korkeat tekniset vaatimukset (Petersson & Wellinger 2009).

2.6.3 Muiden yhdisteiden poistaminen

Biokaasun käyttö liikennepolttoaineena edellyttää kaasun puhdistamista yhdisteistä, jotka voivat aiheuttaa haittaa laitteistoille. Tyypillisimpiä epäpuhtauksia biokaasussa ovat rikkiyhdisteiden lisäksi halogenoidut yhdisteet, siloksaanit, ammoniakki, vesi, pöly ja partikkelit (Persson ym. 2006, Natural Resources Canada 2007).

Kosteus

Biokaasun sisältämä kosteus heikentää biokaasun käytön tehokkuutta ja aiheuttaa korroosiota reagoidessaan muiden haitallisten yhdisteiden kanssa. Vesi voi kondensoitua akkumuloitua putkistoihin, kasvattaa painehävikkejä ja aiheuttaa tukoksia ja kerrostumia. Kosteus biokaasussa voi aiheuttaa ongelmia etenkin kylmissä ilmastoissa (Natural Resources Canada 2007).

Kosteus voidaan poistaa biokaasusta jäähdyttämällä, kompressoimalla, adsorptiolla tai absorptiolla. Kun painetta nostetaan tai lämpötilaa lasketaan, kosteus tiivistyy ja se voidaan erottaa kaasusta. Kosteus voidaan poistaa myös adsorboimalla vesi esimerkiksi aktiivihiileen, silikageeliin tai molekyylliseulaan. Nämä materiaalit voidaan regeneroida nostamalla lämpötilaa tai alentamalla painetta. Muita menetelmiä kosteuden poistoon on absorptio glykoliliuokseen tai imeyttäminen hygroskooppisilla suoloilla (Petersson & Wellinger 2009).

Pöly ja partikkelit

Pöly ja partikkelit voivat olla peräisin biokaasusta tai ne voivat päästä laitteistoihin esimerkiksi putkistojen kautta tai palamisilman mukana. Ne voivat aiheuttaa laitteistojen kulumista. Biokaasun sisältämät pöly ja partikkelit voidaan poistaa suhteellisen edullisesti esimerkiksi suodattimilla tai sykloneilla (Persson ym. 2006, Natural Resources Canada 2007).

Happi ja typpi

Hapen ja typen esiintyminen biokaasussa on yleensä merkki siitä, että biokaasuun on päässyt ilmaa. Tämä on tavallista kaatopaikkakaasussa, johon ilma pääsee kun kaasua kerätään alipaineella kaatopaikalta. Suuret happipitoisuudet biokaasussa voivat aiheuttaa räjähdysvaaran. Typpi ja happi voidaan poistaa biokaasusta molekyyllisellä, aktiivihiilisuodatuksella tai membraaneilla (Persson ym. 2006, Petersson & Wellinger 2009).

Siloksaanit

Siloksaanit ovat haihtuvia silikonyhdisteitä, jotka ovat peräisin erilaisista kulutustuotteista kuten shampoista, pesuaineista, kosmetiikasta ja teollisuuden kemikaaleista kuten liuottimista. Siloksaanit muodostavat palamisen yhteydessä sakkaa ja kerrostumia, jotka voivat aiheuttaa eroosiota tai tukoksia laitteistoissa. Silikonyhdisteet voivat myös päätyä voiteluöljyyn, joka aiheuttaa öljyn vaihtovälin lyhenemisen (Persson ym. 2006). Siloksaaneja ei yleensä ole biokaasussa, jonka raaka-aineena on käytetty maatalousjätettä tai ruokateollisuuden jätteitä, koska nämä jätevirrat eivät yleensä sisällä siloksaaneja. Erityisesti siloksaaneja on jätevedenpuhdistamoiden lietteestä tuotetussa biokaasussa, johon ne päätyvät silikonyhdisteitä sisältävien kulutustuotteiden päädyttyä viemäriverkostoon (Natural Resources Canada 2007).

Siloksaanit voidaan poistaa biokaasusta aktiivihiilellä. Menetelmä on paljon käytetty ja tehokas, mutta hintava koska käytettyä aktiivihiiltä ei voida regeneroida, vaan sen kyllästyessä se täytyy vaihtaa uuteen. Lisäksi biokaasun sisältämät muut epäpuhtaudet kuten rikkivety voivat adsorboitua aktiivihiileen ja lyhentää sen käyttöikää. Siloksaanit voidaan myös poistaa adsorboimalla ne silikageeliin, absorboimalla ne hiilivetyjä sisältävään nesteeseen, tai jäädyttämällä biokaasu ja erottamalla tiivistynyt neste. Jäädyttäminen voidaan myös yhdistää aktiivihiilisuodatuksen, jolloin aktiivihiilen käyttöikä pitenee (Persson ym. 2006, Natural Resources Canada 2007, Petersson & Wellinger 2009).

Halogenoidut yhdisteet

Halogenoituja yhdisteitä voi olla erityisesti kaatopaikkakaasussa, mutta vain harvoin jätevedenpuhdistamoiden lietteestä tuotetussa biokaasussa. Hapettuessaan palamisprosessin aikana halogenoidut yhdisteet voivat aiheuttaa samantapaisia ongelmia laitteistoissa kuin rikkiyhdisteet. Halogenoidut yhdisteet voivat myös panna alulle ympäristölle haitallisten dioksiinien ja furaanien muodostumisen jos olosuhteet (lämpötila, aika) palamisen aikana ovat suotuisat (Persson ym. 2006).

Suurin osa biokaasun puhdistusmenetelmistä kuten absorptio polyetyleeniglykolilla, PSA, membraanisuodatus ja jäädytysprosessit poistavat hiilidioksidin lisäksi myös halogenoidut yhdisteet biokaasusta. Erityisesti PSA-prosessi sopii myös selektiiviseen halogenoitujen yhdisteiden poistoon (Natural Resources Canada 2007).

Ammoniakki

Ammoniakkia muodostuu proteiinien hajotessa. Biokaasun ammoniakkipitoisuus riippuu biokaasun raaka-aineen koostumuksesta, ja prosessin pH:sta (Petersson &

Wellinger 2009). Ammoniakin palaminen johtaa typen oksidien (NO_x) muodostumiseen. Ammoniakkipitoisuudet ovat yleensä rajoitettu kaasuautojen valmistajien toimesta. Liikennebiokaasussa on sallittua yleensä korkeintaan 100 mg/Nm^3 ammoniakkia. (Persson ym. 2006, Natural Resources Canada 2007). Ammoniakki poistuu yleensä biokaasusta kaasun kuivaamisen tai hiilidioksidin poistamisen yhteydessä eikä sitä tarvitse erikseen poistaa (Petersson & Wellinger 2009).

Metaanin poisto jäännöskaasusta

Hiilidioksidia poistettaessa myös pieniä määriä metaania poistuu hiilidioksidin mukana. Suuret metaanihävikit biokaasun puhdistusprosessissa voivat vaikuttaa biokaasun liikennepolttoainekäytön koko elinkaaren aikaisiin kasvihuonekaasupäästöihin, joten metaanihävikkien aktiivinen kontrollointi on tarpeen. Myös taloudellisista syistä on tärkeää pitää metaanihävikki mahdollisimman pienenä (Persson & Wellinger 2006, Börjesson & Mattiasson 2008).

Metaania voi olla esimerkiksi PSA-astian jäännöskaasussa, veden regenerointia käyttävän vesiabsorptiokolonnin ilmassa tai ilman veden regenerointia toimivan vesiabsorptiokolonnin vedessä. Biokaasun puhdistusmenetelmien metaanihävikkejä on mahdollista arvioida eri tavoin. Puhdistuslaitoksilla, jotka käyttävät PSA-prosessia, vesiabsorptiota veden kierrätyksellä, fysikaalista absorptiota tai kemiallista absorptiota on mahdollista ottaa näytteitä jäännöskaasusta ja analysoida jäännöskaasun metaanipitoisuus. Vesiabsorptiota ilman veden kierrätystä käyttävillä laitoksilla metaanin määrä voidaan analysoida vedestä (Persson 2003, Petersson & Wellinger 2009).

Jos puhdistuslaitos on selvillä metaanihävikistään, se voi suorittaa säätötoimenpiteitä prosessissa tai eliminoida metaanipäästöt kokonaan keräämällä ja käsittelemällä jäännöskaasun. Puhdistuslaitoksen jäännöskaasu tai -ilma sisältää harvoin tarpeeksi metaania, jotta sen voisi polttaa ilman esimerkiksi biokaasun lisäämistä. Jäännöskaasu voidaan esimerkiksi sekoittaa palamisilmaan, tai hapettaa termisesti, katalyyttisesti tai biologisesti (Persson 2003, Petersson & Wellinger 2009).

2.7 Biokaasun puhdistusmenetelmien vertailu

Ruotsalaisilla, vuonna 2003 käytössä olleilla, biokaasun puhdistuslaitoksilla energiankulutus oli noin $0,36\text{-}0,88 \text{ kWh/Nm}^3_{\text{biometaania}}$ (taulukko 5). Puhdistuslaitteistovalmistajan mukaan kemiallinen absorptio näyttäisi kuluttavan muita menetelmiä vähemmän energiaa. Laitoksen energiankulutukseen vaikuttaa puhdistusmenetelmän lisäksi myös laitoksen käyttöaste ja raakabiokaasun metaanipitoisuus. Mitä enemmän metaania on biokaasussa, sitä vähemmän hiilidioksidia tulee poistaa, ja sitä vähemmän energiaa kuluu. Raakabiokaasun metaanipitoisuus laitoksilla vaihteli välillä 60 % - 80 %. Kaikilla laitoksilla puhdistetun biokaasun metaanipitoisuus ylitti puhdistusmenetelmästä riippumatta Ruotsin liikennebiokaasun laatustandardin vaativan vähintään 95 % metaanipitoisuuden (Persson 2003).

Metaanihävikki ilmoitetaan yleensä prosenttina raakabiokaasun metaanimäärästä. On tavallista että puhdistuslaitteistojen valmistajat ilmoittavat metaanihävikin määräksi maksimissaan 2 % PSA-prosessille ja vesiabsorptiolle. Yleensä hävikkiä ei kuitenkaan ole mitattu vaan luku on saatu teoreettisesti laskemalla. Ruotsalaisten biokaasun puhdistuslaitosten todelliset metaanihävikit vaihtelivat 2 %:sta 18 %:iin (taulukko 6). Vesipesua veden kierrätyksellä käyttävältä laitokselta mitattiin jopa 18 % metaanihävikki, joskin virhemahdollisuus tuloksissa oli suuri johtuen ongelmista raakabiokaasun metaanipitoisuutta mitattaessa. Kemiallisessa absorptiossa metaanihävikki on laitteistovalmistajan mukaan $0,1\text{-}0,2 \text{ %}$. Tämä johtuu kemikaalin selektiivisestä

reagoinnista hiilidioksidin kanssa. Tutkimuksessa mukana olleelta laitokselta hävikkiä ei ole kuitenkaan mitattu (Persson 2003).

Taulukko 6. Ruotsalaisten biokaasun puhdistuslaitosten käyttämien puhdistusmenetelmien vertailu laitosten ja laitteistojen valmistajien antamien tietojen perusteella (Persson 2003).

Ominaisuus	PSA		Vesiabsorptio				Absorptio orgaanisilla liuottimilla	
			Veden kierrätys	Ilman veden kierrätystä			Fysikaalinen (Sele-xol)	Kemiallinen
Laitoksen kapasiteetti (Nm ³ biokaasua/h)	350	600	75	300	150	80	250	300
Käyttöönotto-vuosi	2000	2000-2002	1998	2002	2000	1999	2000	2002
Energiankulutus (kWh/Nm ³ biome taania)								
-Laitos	0,6 (0,88) ¹	0,5 (0,88) ¹	0,3 (0,6) ¹	0,36	0,6 (1,0) ¹	0,36	0,41	-
-Valmistaja	0,3-1,0	0,3-1,0	0,45-0,9	0,45-0,9	0,45-0,9	0,45-0,9	-	0,15
Biokaasun metaanipitoisuus (%)	75-80	65	68	66-68	65	60	70	-
Biometaanin metaanipitoisuus (%)								
-Laitos	96-99	98	97	96-98	96-98	97	97	98
-Valmistaja	>97	>97	97-99	97-99	97-99	97-99	-	~99
Metaanihävikki (%)								
-Laitos (mitattu)	10 ²	2 ³	18 ⁴	-	-	-	2-10 ⁵	-
-Valmistaja	2	2	-	<2	-	-	-	0,1-0,2

- Ei tietoja saatavana

¹ Sisältää paineistuksen

² Valmistajan mukaan johtuu vuotavista venttiileistä, jotka korjaamalla voidaan päästä <2 % metaanihävikkiin

³ Laskennallinen

⁴ Suuri virhemarginaali johtuen ongelmista mitattaessa metaania raakabiokaasusta

⁵ Laitoksen kapasiteetti kaksinkertaistui 2002, minkä jälkeen metaanihävikkiä ei ole mitattu

Ruotsalaisilta biokaasun puhdistuslaitoksilta saadun kokemuksen perusteella PSA-prosessi on tehokas menetelmä hiilidioksidin, kosteuden ja rikkivedyn poistoon biokaasusta. Adsorptiomateriaalista riippuen rikkivety tulee kuitenkin yleensä poistaa biokaasusta ennen PSA-prosessia, jotta se ei kertyisi prosessissa käytettävään adsorptiomateriaaliin. Menetelmän etuja ovat kemikaalien vähäinen kulutus ja PSA-

prosessista kertynyt kokemus (taulukko 7). Ongelmia PSA-prosessissa ovat aiheuttaneet adsorptiomateriaalista irronneet pöly ja partikkelit puhdistetussa kaasussa, mikä on johtunut venttiilien viallisesta toiminnasta. Vesiabsorptiossa ei myöskään käytetä kemikaaleja, ja myös tästä menetelmästä on runsaasti kokemusta. Kun vesiabsorptiota käytetään ilman veden kierrätystä, haittapuolena on suuri vedenkulutus. Tämän vuoksi sitä käytetäänkin yleensä esimerkiksi jätevedenpuhdistamoilla, joissa absorptiossa voidaan käyttää puhdistettua jätevettä. Vesiabsorptiossa ongelmia on aiheuttanut absorptio- ja desorptiokolonnien täytekappaleiden tukkeutuminen. Absorptiosta orgaanisilla liuottimilla on vähemmän kokemusta Ruotsissa kuin PSA-prosessista ja vesiabsorptiosta. Ongelmia absorptiossa polyetyleeniglykolilla on aiheuttanut absorptionesteen ilmasta absorboima kosteus, joka johtaa puhdistetun kaasun alhaiseen metaanipitoisuuteen. Kemiallisessa absorptiossa sähkön tarve on muihin menetelmiin verrattuna pieni, mutta absorptiomateriaalin regenerointi vaatii kuitenkin suhteellisen paljon lämpöenergiaa. Kemiallisessa absorptiossa metaanihävikki on valmistajien mukaan pienempi kuin muilla menetelmillä. Kemiallisen absorptiion haittoja ovat myrkyllisten aineiden käsittely ja kemiallisen vuodon riski (Persson 2003).

Taulukko 7. Yleisimpien biokaasun puhdistusmenetelmien ominaisuuksien vertailu ruotsalaisilta puhdistuslaitoksilta saadun kokemuksen perusteella (Persson 2003).

Ominaisuus	PSA	Vesiabsorptio		Absorptio orgaanisilla liuottimilla	
		Veden kierrätys	Ilman veden kierrätystä	Fysikaalinen (Selexol)	Kemiallinen
Lämmöntarve	Ei	Ei	Ei	Ei	Suuri (regeneraatio)
Vedenkulutus	Matala	Keskisuuri	Suuri	Matala	Matala
Kemikaalien kulutus	Matala	Matala	Matala	Korkea	Korkea
Rikkivedyn puhdistusvarmuus	Korkea	Matala	Matala	Keskitaso	Keskitaso-Korkea*
Kosteuden puhdistusvarmuus	Keskitaso	Matala	Matala	Keskitaso	Matala-Korkea*
Mahdollisuus mitata metaanihävikkiä jäännöskaasusta	Kyllä	Osittain	Ei	Kyllä	Kyllä
Kokemus tekniikasta Ruotsissa	Korkea	Korkea	Korkea	Matala	Matala

*Riippuu käytetystä kemikaalista

Myös Urban ym. (2008) ovat verranneet käytetyimpiä biokaasun puhdistusmenetelmiä puhdistuslaitteistovalmistajien antamien tietojen perusteella (taulukko 8). Osa vertailun laitoksista oli vielä pilottivaiheessa tietoja kerättyä. Valmistajien antamat metaanihävikit eroavat jonkin verran toisistaan samojen puhdistusmenetelmien kohdalla. Valmistajien mukaan metaanihävikki riippuukin käyttöolosuhteista.

Taulukko 8. Yleisimpien biokaasun puhdistusmenetelmien vertailu puhdistuslaitteistovalmistajien antamien tietojen perusteella (Urban ym. 2008).

Parametri	PSA	Vesiabsorptio	Fysikaalinen absorptio	Kemiallinen absorptio
Biokaasun esikäsittely tarpeen ¹	Kyllä	Ei	Ei	Kyllä
Käyttöpaine (bar)	4-7	4-7	4-7	-
Metaanihävikki (%)	<3 % / 6-10 ²	< 1 % / < 2 ²	2-4	< 0,1
Biometaanin metaanipitoisuus ³ (%)	>96	>97	>96	>99
Sähkön kulutus ⁴ (kWh/Nm ³ biokaasua)	0,25	<0,25	0,25-0,33	<0,15
Lämmön tarve (°C)	Ei	Ei	55-80 ⁵	160
Kontrolloitavuus verrattuna nimelliskuormaan (%)	+/- 10-15	50-100	10-100	50-100
Laitosten lukumäärä ⁶ (kpl)	>20	>20	2	5

- Ei tietoa saatavana

¹ Raakabiokaasu, jossa korkeintaan 500 mg/m³ rikkivetyä. Korkeimmilla rikkipitoisuuksilla esikäsittely suositeltavaa myös muille puhdistusmenetelmille

² <3 % Carbotech, 6-10 % QuestAir, <1 % Malmberg, <2 % Flotech

³ Puhdistetun kaasun metaanipitoisuus riippuu valituista muuttujista, esim. biokaasun ominaisuuksista. Luvut valmistajien ilmoittamia arvoja ilmaa sisältämättömälle biokaasulle

⁴ kWh/Nm³ biokaasua, kompressoitu 7 baarin paineeseen

⁵ Voi olla mahdollista käyttää lämpöpumppua prosessin sisäiseen lämmön tuottamiseen

⁶ Jotkut laitoksista pilottivaiheessa

Biokaasun puhdistusmenetelmillä on omat erityispiirteensä, mutta yleisesti ne ovat lähes samanarvoisia puhdistuksen tehokkuuden, kaasun laadun ja energiankulutuksen suhteen. Uusien biokaasun puhdistusmenetelmien kuten membraanisuodatuksen ja kryotekniikan toiminnasta on vielä vähän tietoa, mutta esimerkiksi eräs kryotekniikan etu on mahdollisuus tuottaa nestemäistä hiilidioksidia (Persson ym. 2007, Electrigaz Technologies Inc. 2008).

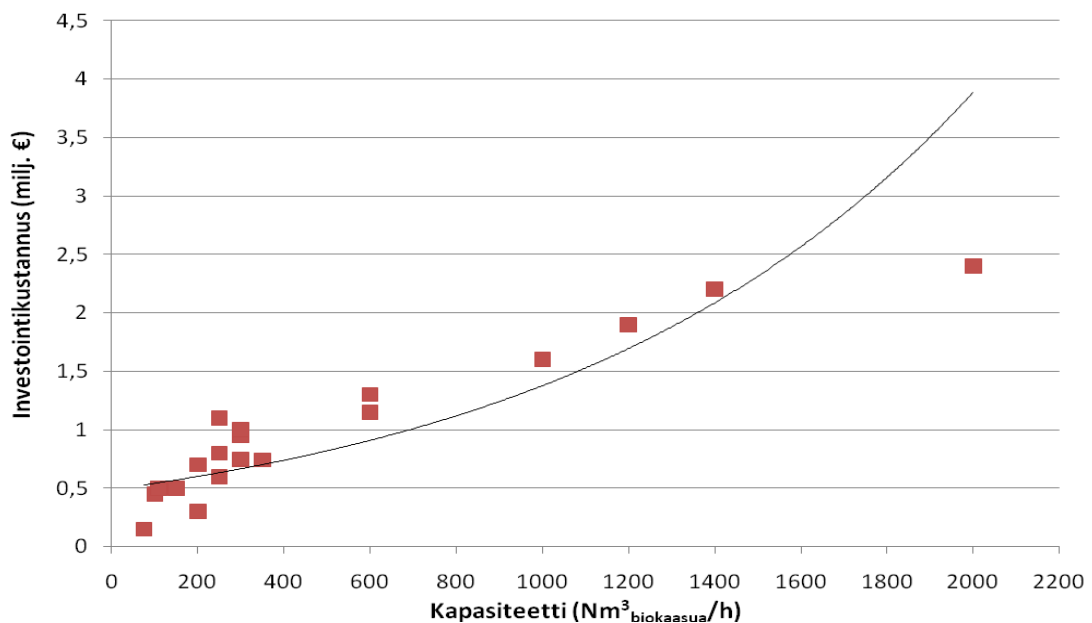
Puhdistusmenetelmän valintaan on ruotsalaisilla biokaasun puhdistuslaitoksilla vaikuttaneet eniten puhdistuslaitoksen kustannukset, kokemukset muilta laitoksilta sekä puhdistusmenetelmän vähäinen metaanihävikki (Persson 2003). Myös ympäröivät olosuhteet, kuten esimerkiksi sähkön ja lämmön hinta, edullisesti saatavilla oleva vesi ja biokaasun koostumus vaikuttavat biokaasun puhdistusmenetelmän valintaan (Bekkering ym. 2009, Persson & Wellinger 2009).

2.8 Biokaasun puhdistuksen kustannukset

Biokaasun liikennepolttoainekäytön kustannuksiin vaikuttavat biokaasun puhdistuksen kustannusten lisäksi biokaasun raaka-aineen ja tuotannon kustannukset, käsittelyjäännöksen jälkikäsittely ja kaasun siirto ja jakelu (Persson 2003). Biokaasun puhdistuksen kustannukset koostuvat investointi- sekä käyttökustannuksista.

2.8.1 Investointikustannukset

Biokaasun puhdistuslaitoksen investointikustannukset riippuvat useista tekijöistä, joista merkittävin on laitoksen koko (Persson ym. 2006). Biokaasun puhdistuslaitosten investointikustannukset kasvavat laitoksen koon kasvaessa (kuva 4), mutta samalla suurempien laitosten investointikustannukset/ Nm^3 biokaasua laskevat. Investointikustannuksissa eri biokaasun puhdistusmenetelmien välillä ei ole suuria eroja, koska puhdistusmenetelmissä käytetään paljon samanlaisia laitteita, kuten kaasu- ja vesipumppuja, sähkömoottoreita ja säiliöitä. Tosin erään ruotsalaisen valmistajan mukaan vesiabsorptio veden kierrätyksellä on investointina 20 % kalliimpi kuin ilman veden kierrätystä, sillä tällöin tarvitaan enemmän komponentteja, esimerkiksi desorptiokolonni (Persson 2003).



Kuva 4. Biokaasun puhdistuslaitosten investointikustannuksia (milj. €) vuosilta 1998-2003. Tiedot on koottu kirjallisuudesta, laitteistovalmistajilta ja olemassa olevilta laitoksilta (Persson 2003).

Ruotsalaisten biokaasun puhdistuslaitosten investointikustannukset vuosina 1998-2003 olivat $100\text{-}350 \text{ Nm}^3$ biokaasua/h käsitteleville laitoksille noin $2000\text{-}4500 \text{ €/Nm}^3$ ¹ ja 1400 Nm^3 biokaasua/h käsittelevälle laitokselle noin 1500 €/Nm^3 ². Investointikustannukset eivät sisällä kaasun paineistusta liikennekäyttöä varten, varastointia eikä jakeluasemaa. Joissain tapauksissa investointikustannukset sisältävät rakennuksen, jossa puhdistuslaitteisto sijaitsee. Laitosten puhdistusmenetelminä käytettiin PSA-prosessia, vesiabsorptiota, fysikaalista absorptiota ja kemiallista absorptiota (Persson 2003).

¹ $20\ 000\text{-}45\ 000 \text{ SEK/Nm}^3$, $1 \text{ SEK}=0,1 \text{ €}$ 2.12.2009

² $15\ 000 \text{ SEK/Nm}^3$

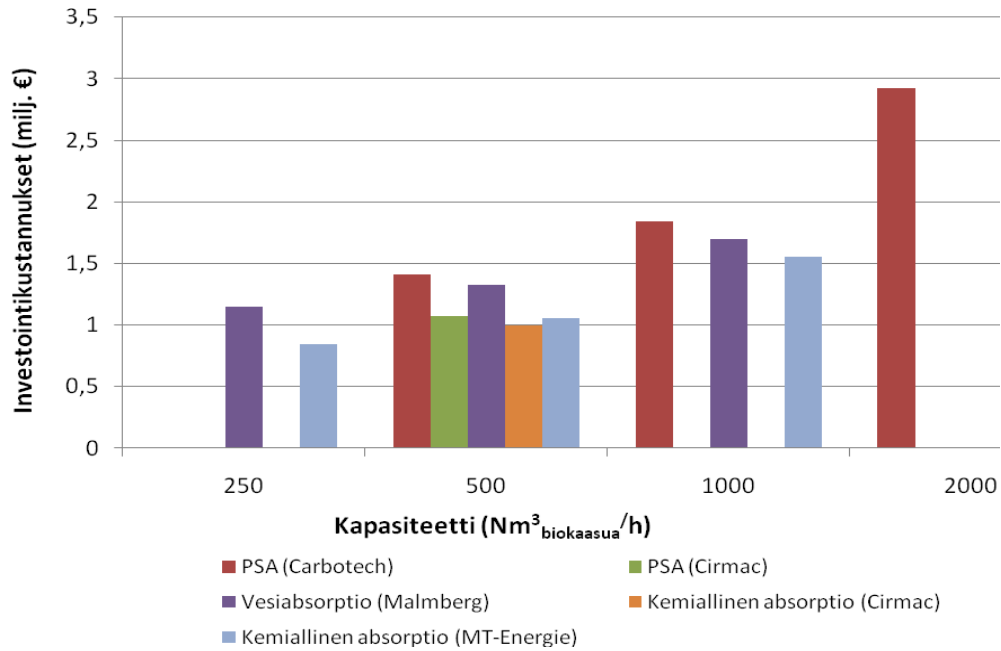
Saksalainen Fraunhofer Instituutti on kerännyt biokaasun puhdistuksen investointi- (taulukko 9), käyttö- ja kokonaiskustannuksia vuosina 2007-2008 viideltä puhdistuslaitteistovalmistajalta: Carbotech (PSA), Cirmac (PSA, kemiallinen absorptio), Malmberg (vesiabsorptio), Flotech (vesiabsorptio) ja MT-Energie (kemiallinen absorptio). Yhdeltä laitteistovalmistajalta (Flotech) oli ainoastaan saatavilla biokaasun puhdistuksen kokonaiskustannukset. Oletuksena on käytetty 53 % metaanipitoisuutta raakabiokaasussa ja 97 % metaanipitoisuutta puhdistetussa kaasussa. Kustannustiedot sisältävät rikinpoiston niiden menetelmien osalta, joiden kohdalla se on tarpeen. Oletetut metaanihävikit eri puhdistusmenetelmille ovat seuraavat: PSA 3 %, vesiabsorptio (Malmberg) 1 %, vesiabsorptio (Flotech) 2 %, kemiallinen absorptio 0,1 % (Urban ym. 2008).

Urban ym. (2008) mukaan biokaasun puhdistuslaitosten investointikustannukset 500 Nm³_{biokaasua}/h käsittelevälle laitokselle ovat keskimäärin miljoona euroa, kun 2000 Nm³_{biokaasua}/h käsittelevän PSA-laitoksen investointikustannukset lähenevät kolmea miljoonaa euroa (kuva 5). Investointikustannukset €/Nm³_{biokaasua} kuitenkin laskevat laitokseen kasvaessa ollen 2000 Nm³_{biokaasua}/h käsittelevällä laitoksella noin 1500 €/Nm³ ja 500 Nm³_{biokaasua}/h käsittelevällä laitoksella keskimäärin 2300 €/Nm³. Investointikustannuksissa suurimmat erot näyttäisivät olevan laitteistovalmistajien välillä eikä niinkään puhdistusmenetelmien välillä. Investointikustannukset ovat samaa tasoa Perssonin (2003) keräämien tietojen kanssa.

Taulukko 9. Laitteistovalmistajien ilmoittamia biokaasun puhdistuslaitosten investointikustannuksia (€) (Urban ym. 2008).

Puhdistusmenetelmä (valmistaja)	Puhdistuslaitoksen kapasiteetti (Nm ³ _{biokaasua} /h)			
	250	500	1000	2000
PSA (Carbotech)	-	1 407 500	1 840 800	2 925 000
PSA (Cirmac)	-	1 068 600	-	-
Vesiabsorptio (Malmberg)	1 145 000	1 323 500	1 699 000	-
Kemiallinen absorptio (Cirmac)	-	996 200	-	-
Kemiallinen absorptio (MT-Energie)	847 400	1 057 400	1 556 100	-

- Ei tietoja saatavana



Kuva 5. Biokaasun puhdistuksen investointikustannukset (milj. €) eri puhdistusmenetelmillä ja erikokoisissa laitoksissa (Urban ym. 2008).

2.8.2 Käyttökustannukset

Biokaasun puhdistuslaitoksen käyttökustannukset riippuvat laitoksen iästä ja sen käyttöajasta. Suurimmat käyttökustannukset aiheuttavat sähkön kulutus, työvoima ja puhdistusmenetelmästä riippuen muiden materiaalien, kuten veden tai kemikaalien kulutus (Persson & Wellinger 2006).

Sähköä biokaasun puhdistuslaitoksessa kuluttavat eniten kompressorit ja pumput. Muita sähköä kuluttavia osia ovat esimerkiksi lämmönvaihtimet, tuulettimet, tietokoneet ja valaistus (Persson 2003). Luvussa 2.7 on esitetty esimerkkejä eri puhdistusmenetelmien sähkönkulutuksesta.

Työvoimaa tarvitaan biokaasun puhdistuslaitoksessa sekä valvontaan että ylläpitoon. Puolesta tunnista tuntiin valvontaa on yleisesti tarpeen päivittäin riippumatta laitoksen koosta tai puhdistusmenetelmästä. Koska työn määrä ei ole suoraan verrannollinen laitoksen kokoon, valvonnan kustannukset biokaasun normaalikuutiota kohden ovat suuremmat pienemmillä laitoksilla. Ylläpitoon käytetty aika oli ruotsalaisilla biokaasunpuhdistuslaitoksilla 25 - 150 h/a vuonna 2003 (Persson 2003).

Veden kulutus on lähes olematon, kun biokaasu puhdistetaan PSA-prosessilla, kemiallisella absorptiolla tai fysikaalisella absorptiolla. Vettä käytetään ainoastaan kaasun tai kompressorin jäähdyttämiseen. Vesiabsorptiossa käytettävän veden määrä riippuu laitoksen koosta ja absorptiokolonnin lämpötilasta ja paineesta, koska vesi absorboi enemmän hiilidioksidia matalissa lämpötiloissa ja korkeassa paineessa. Ruotsalaisten biokaasun puhdistuslaitosten ja puhdistuslaitteistovalmistajien mukaan vesiabsorptio veden kierrätyksellä kuluttaa muutaman kuutiometrin vettä tunnissa, sillä osa prosessivedestä on vaihdettava tunneittain. Vesiabsorptio ilman veden kierrätystä kuluttaa kymmeniä kuutiometrejä vettä tunnissa (taulukko 10) (Persson 2003, Electrigaz Technologies Inc. 2008).

Taulukko 10. Veden kulutus ruotsalaisilla vesiabsorptiota ilman veden kierrätystä käyttävillä biokaasun puhdistuslaitoksilla (Persson 2003).

Kapasiteetti (Nm ³ _{biokaasua} /h)	Otettu käyttöön (vuosi)	Toimintapaine (bar)	Veden kulutus (m ³ /h)
300	2002	10-13	30
150	2000	8-12	30-35
80	1999	7,5	11-14

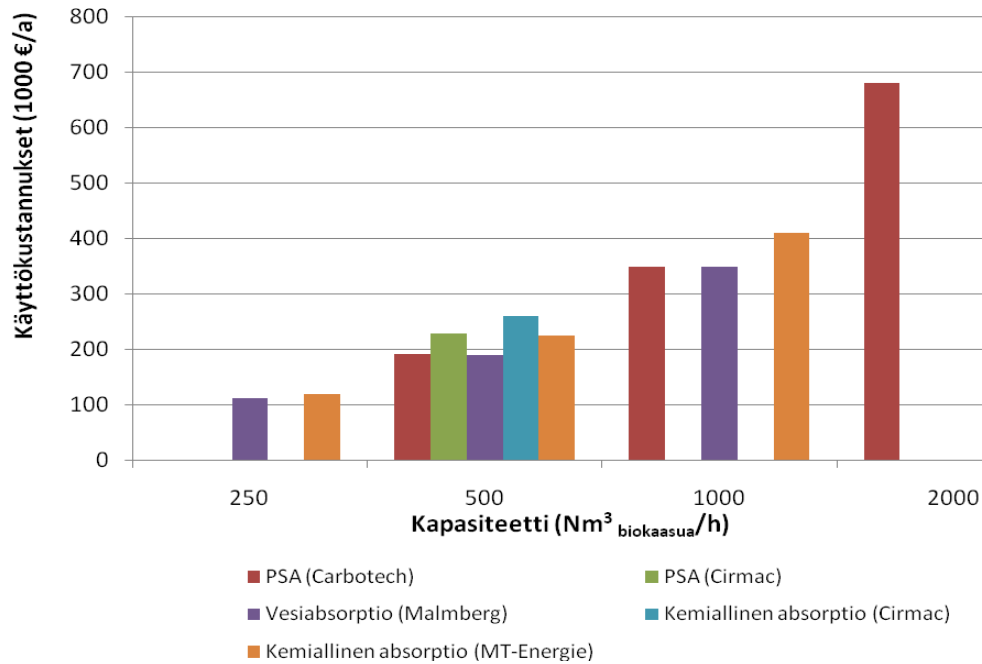
Kemikaaleja ei juuri käytetä vesiabsorptiossa ja PSA-prosessissa. Fysikaalisessa ja kemiallisessa absorptiossa käytettävät kemikaalit tulee ajoittain vaihtaa regeneraation aikana tapahtuvien hävikkien vuoksi, tai jos kemikaali kyllästyy esimerkiksi rikkivedellä. 300 Nm³_{biokaasua}/h käsittelevän kemiallista absorptiota käyttävän laitoksen on vaihdettava prosessissa käytettävä kemikaali, 600 litraa, joka viides vuosi. Myös rikkivedyn poistamiseen käytettävä materiaali, esimerkiksi aktiivihiili, on vaihdettava ajoittain. Muita kaikkien puhdistuslaitosten käyttämiä materiaaleja ovat esimerkiksi kompressorien voiteluöljy ja kalibraatiokaasut (Persson 2003).

Biokaasun puhdistuslaitosten käyttökustannukset nousevat laitokseen kasvaessa (taulukko 11, kuva 6). Käyttökustannukset 500 Nm³_{biokaasua}/h käsittelevälle laitokselle ovat keskimäärin 220 000 €/a. Kuten investointikustannukset, myös käyttökustannukset normaalikuutiota (biokaasua) kohden kuitenkin laskevat suuremmissa puhdistusyksiköissä. Käyttökustannukset 500 Nm³_{biokaasua}/h käsittelevällä laitoksella ovat noin 440 €/Nm³ kun ne 2000 Nm³_{biokaasua}/h käsittelevällä laitoksella ovat noin 340 €/Nm³ (Urban ym. 2008).

Taulukko 11. Biokaasunpuhdistuslaitosten käyttökustannukset laitteistovalmistajien mukaan (€/a) (Urban ym. 2008).

Puhdistusmenetelmä (valmistaja)	Puhdistuslaitoksen kapasiteetti (Nm ³ _{biokaasua} /h)			
	250	500	1000	2000
PSA (Carbotech)	-	191 200	349 600	681 200
PSA (Cirmac)	-	228 300	-	-
Vesiabsorptio (Malmberg)	111 400	190 200	348 200	-
Kemiallinen absorptio (Cirmac)	-	260 700	-	-
Kemiallinen absorptio (MT-Energie)	119 600	224 000	410 300	-

- Ei tietoja saatavana



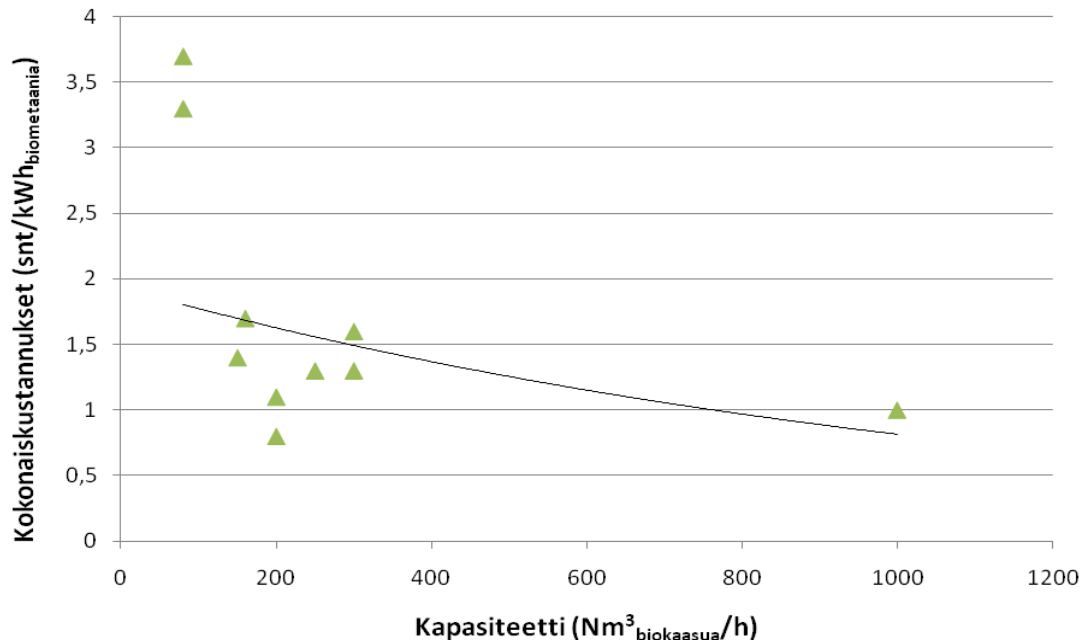
Kuva 6. Biokaasun puhdistuksen käyttökustannukset (1000 €/a) eri puhdistusmenetelmillä ja erikokoisissa laitoksissa laitteistovalmistajien mukaan (Urban ym. 2008).

2.8.3 Biokaasun puhdistuksen kokonaiskustannukset

Biokaasun puhdistuksen kokonaiskustannukset, sisältäen sekä pääoma- että käyttökustannukset, riippuvat paljolti laitoksen koosta. Kokonaiskustannukset kilowattituntia biometaania kohden laskevat laitokseen kasvaessa. Kokonaiskustannukset pienille, <math>< 100 \text{ Nm}^3_{\text{biokaasua}}/\text{h}</math> käsitteleville biokaasun puhdistuslaitoksille olivat Perssonin (2003) mukaan noin 3-4 snt/kWh_{biometaania}³. Suurempien, 200-300 Nm³ biokaasua/h käsittelevien laitosten kokonaiskustannukset olivat noin 1-1,5 snt/kWh_{biometaania}⁴ (kuva 7).

³ 0,30-0,40 SEK/kWh_{biometaania}, 1 SEK=0,1 € 2.12.2009

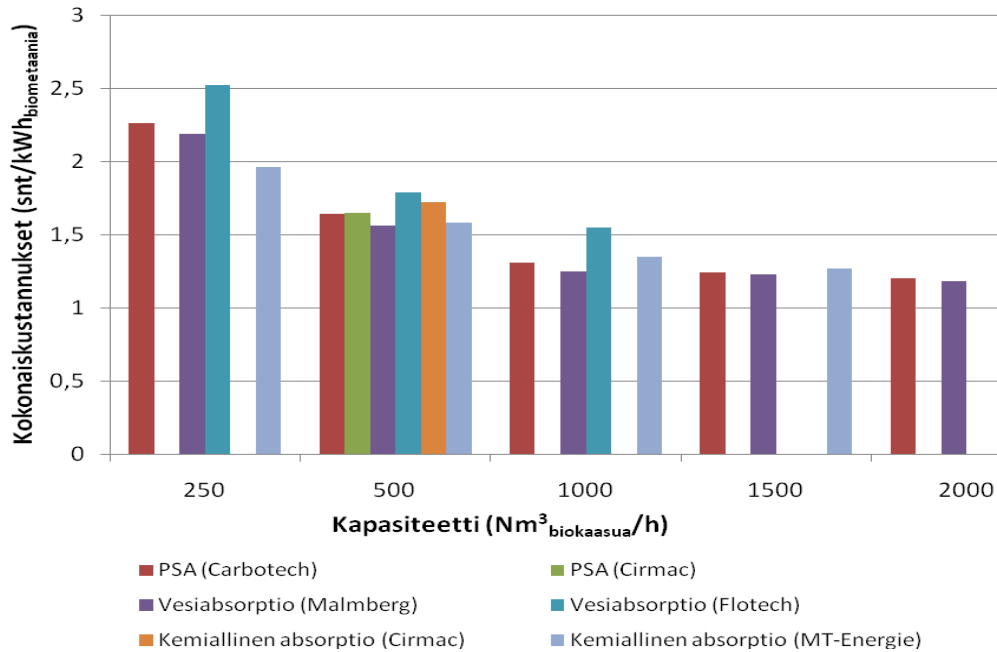
⁴ 0,10-0,15 SEK/kWh_{biometaania}



Kuva 7. Biokaasun puhdistuksen kokonaiskustannukset (snt/kWh_{biometaania}). Tiedot on koottu kirjallisuudesta, laitteistovalmistajilta ja olemassa olevilta laitoksilta (Persson 2003).

Pääomakustannukset riippuvat puhdistuslaitteiston investointikustannuksista, lainan reaalikorosta ja takaisinmaksuajasta. Muutokset korkoprosentissa ja takaisinmaksuajassa vaikuttavat enemmän puhdistetun kaasun kustannuksiin kuin esimerkiksi sähkön hinnan muutokset. Pääomakustannusten muutosten vaikutus korostuu, jos biokaasun puhdistuslaitoksen käyttöaste on alhainen (Persson 2003).

Biokaasun puhdistuksen kokonaiskustannukset kilowattituntia biometaania kohden laskevat kun puhdistuslaitoksen kapasiteetti kasvaa myös Fraunhofer Instituutin keräämien tietojen perusteella (kuva 8). Kokonaiskustannukset 250 Nm³_{biokaasua}/h käsittelevälle laitokselle ovat keskimäärin 2,23 snt/kWh_{biometaania}, kun ne 2000 Nm³_{biokaasua}/h käsittelevälle laitokselle ovat noin 1,20 snt/kWh_{biometaania} (taulukko 12). Oletuksena on käytetty investoinneille 15 vuoden takaisinmaksuaikaa ja 6 % korkoa (Urban ym. 2008).



Kuva 8. Biokaasun puhdistuksen kokonaiskustannukset (snt/kWh_{biometaania}) eri puhdistusmenetelmillä ja erikokoisissa laitoksissa (Urban ym. 2008).

Taulukko 12. Biokaasun puhdistuksen kokonaiskustannukset laitoksissa laitteistovalmistajien mukaan (snt/kWh_{biometaania}) (Urban ym. 2008).

Puhdistusmenetelmä (valmistaja)	Puhdistuslaitoksen kapasiteetti (Nm ³ biokaasua/h)				
	250	500	1000	1500	2000
PSA (Carbotech)	2,26	1,64	1,31	1,24	1,20
PSA (Cirmac)	-	1,65	-	-	-
Vesiabsorptio (Malmberg)	2,19	1,56	1,25	1,23	1,18
Vesiabsorptio (Flotech)	2,52	1,79	1,55	-	-
Kemiallinen absorptio (Cirmac)	-	1,72	-	-	-
Kemiallinen absorptio (MT-Energie)	1,96	1,58	1,35	1,27	1,23
Keskiarvo	2,23	1,66	1,37	1,25	1,20

- Ei tietoja saatavana

Luvun alussa esitetyt biokaasun puhdistuksen kokonaiskustannukset 200-300 Nm³/h biokaasua käsittelevillä laitoksilla (noin 1-1,5 snt/kWh) (Persson 2003), ovat huomattavasti pienemmät kuin puhdistuslaitteistovalmistajilta vuosina 2007-2008 kerätyt tiedot kokonaiskustannuksista 250 Nm³/h biokaasua käsittelevillä puhdistuslaitoksilla (taulukko 12).

2.9 Biokaasun siirto ja jakelu

Biometaanin jakelu tapahtuu yleensä paikallisesti ja lähellä tuotantokohdetta (Åhman 2009). Ruotsissa maakaasun tankkausasemat on rakennettu lähinnä maakaasuverkon läheisyyteen. Ne eivät kuitenkaan kata koko markkina-aluetta, koska päämaakaasuverkko kattaa Ruotsissa vain länsirannikon. Biokaasulaitokset voivat tarjota polttoainetta kaasuautoille laajalla maantieteellisellä kattavuudella. Ruotsissa puhdistetun biokaasun jakelu on pääasiallisesti keskittynyt tuotantolaitosten läheisyydessä sijaitseville tankkausasemille tai kaasun siirto hoidetaan rekkojen kuljettamilla pullopattereilla. Kun biometaani siirretään putkistolla, se tapahtuu yleensä syöttämällä biometaani alueelliseen

kaasuverkkoon (Svensen ym. 2009). Ruotsissa harkitaan osittaista siirtymistä biokaasun puhdistamiseen kryotekniikalla. Kryotekniikalla biometaani on puhdistuksen jälkeen nestemäisessä muodossa. Nestemäisenä metaani menee 1/600 –osaan verrattuna normaalipaineiseen kaasuun, joten sen kuljetus on edullisempaa (Torri 2009). Metaanin kiehumispiste on -160°C , joten biometaanin kuljetus nestemäisenä vaatii kuitenkin jäädytyksen, joka kuluttaa energiaa.

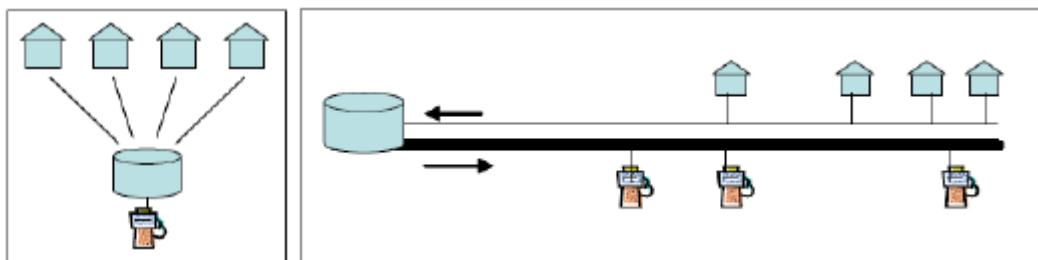
2.9.1 Biokaasun siirto

Biokaasun siirrolla tarkoitetaan sekä biokaasun siirtoa biokaasulaitokselta biokaasun puhdistuslaitokselle että puhdistetun biokaasun eli biometaanin siirtoa puhdistuslaitokselta tankkausasemalle. Kaasu voidaan kuljettaa putkessa tai paineistetussa, vaihtolavan tavoin toimivassa pullopatterissa. Puhdistettu biometaani voidaan myös kuljettaa nestemäisenä (Gustaffson & Stoor 2008, Svensen ym. 2009). Eri vaihtoehtoja biokaasun siirtoon voidaan yhdistää, esimerkiksi käyttämällä joillain alueilla putkea ja toisella pullopattereita. Siirtotavan valinta riippuu yleensä sijaintipaikan ominaisuuksista (Ferré ym. 2009).

Siirto erillisellä biokaasuputkella

Erityisesti maatilakohtaisessa biokaasun tuotannossa biokaasu voidaan siirtää biokaasulaitoksista puhdistuslaitokselle paikallisella verkolla, jolla siirretään raakabiokaasu putkia pitkin useasta tuotantokohteesta yhteen puhdistuslaitokseen (kuva 9). Tällöin tankkausasema on kannattavinta rakentaa puhdistuslaitoksen läheisyyteen (Svensen ym. 2009). Siirto puhdistuslaitokselta tankkausasemalle voidaan tehdä joko maan alla tai maan päällä kulkevalla putkistolla. Lyhyillä etäisyyksillä ja yksityisesti omistetuilla kiinteistöillä tämä on yleensä kustannustehokkain vaihtoehto (Rutledge 2005).

Toinen vaihtoehto on käyttää alueellista verkkoa, jossa on erilliset, vierekkäin kulkevat putket raakabiokaasulle ja puhdistetulle biokaasulle (kuva 9). Biokaasun tuottajat voivat liittyä raakabiokaasuputkeen joka johtaa puhdistuslaitokselle. Puhdistettu biokaasu johdetaan takaisin toista putkea pitkin, jonka varrelle voidaan rakentaa tankkausasemia sopiviin paikkoihin (Svensen ym. 2009).

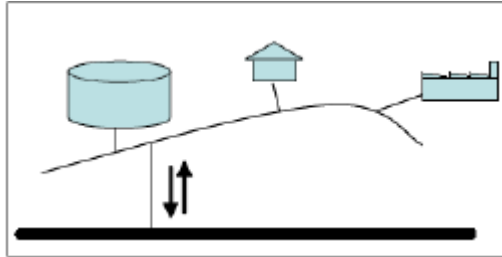


Kuva 9. Paikallinen putkisto biokaasun siirtämiseksi maatilakohtaisilta biokaasulaitoksilta biokaasun puhdistuslaitokseen vasemmalla, alueellinen verkko oikealla. Alueellisessa verkossa erilliset putket raakabiokaasulle ja puhdistetulle biokaasulle kulkevat rinnakkain (Svensen ym. 2009).

Erillinen biokaasuputki on investointina suuri mutta käyttövaiheessa edullinen. Investoinnin kannattavuuden edellytyksenä on kaasun vakaa kulutus. Kaasuputkena voidaan käyttää pakkasen kestävästä muoviputkesta, joten sitä ei tarvitse kaivaa yhtä syväälle kuin esimerkiksi vesiputkesta. Kaasu siirretään putkessa yleensä neljän tai kahdeksan baarin paineessa (Gustaffson & Stoor 2008). Åhmanin (2009) mukaan pitkällä aikavälillä biometaanin siirto on kannattavinta putkistoissa.

Siirto maakaasuverkon avulla

Maakaasuverkko mahdollistaa lähes rajattoman varastointi- ja jakelujärjestelmän puhdistetulle biokaasulle. Maakaasuverkkoon syötetyn biometaanin on täytettävä verkkoon johtamiselle asetetut laatuvaatimukset. Maakaasuverkkoon syötettyä biometaania voidaan käyttää maakaasun ohella missä tahansa maakaasuverkkoon liitetyssä laitteistossa (esimerkiksi kotitalouslaitteet, kaupalliset/teolliset kaasulaitteistot, kompressoitun biokaasun tankkausasemat) (Rutledge 2005). Biometaani voidaan syöttää joko suoraan pääkaasuverkkoon tai alueellisen verkon kautta (kuva 10) (Svensen ym. 2009).



Kuva 10. Biometaanin syöttö puhdistuslaitokselta päämaakaasuverkkoon alueellisen kaasuverkon kautta (Svensen ym. 2009).

Suomessa maakaasun siirrosta ja jakelusta vastaa Gasum Oy. Maakaasuverkko ulottuu Tampereen pohjoispuolelle (kuva 11). Suomessa oli vuonna 2009 16 maakaasun tankkausasemaa, joista 14 operoi Gasum Oy ja kahta St1 yhteistyössä Haminan Energian ja Mäntsälän sähkön kanssa (Gasum Oy 2009b).



Kuva 11. Maakaasuverkko Suomessa (Gasum Oy 2009a).

Biometaanin rekkakuljetus pullopattereissa

Biometaanin kuljetus pullopattereissa rekoilla on hyvä vaihtoehto silloin, kun biometaanin siirto puhdistuslaitokselta tankkausasemalle erillistä putkistoa pitkin tai maakaasuverkon avulla ei ole mahdollista tai kannattavaa (Rutledge 2005). Pullopatterikuljetusta varten kaasu paineistetaan 200-300 baariin, minkä vuoksi puhdistuslaitoksella on oltava paineistusjärjestelmä. Pullopattereita on saatavissa eri kokoluokissa (Gustaffson & Stoor 2008).

Pullopatterikuljetuksen investointikustannukset ovat pienemmät verrattuna kuljetukseen erillisellä biokaasuputkella, mutta kuljetuskustannukset ovat korkeammat

(Gustaffson & Stoor 2008). Biometaanin kuljetusta pullopattereissa käytetään yleensä kaasun siirtoon kaukana oleville sekä ilman erillistä biokaasuputkea oleville tankkausasemille, sekä varavaihtoehtona jos putkikuljetuksessa ilmenee ongelmia. Pullopatterikuljetus on usein edellytys kattavan tankkausasemaverkoston rakentamiseksi myös alueille, joilla ei ole kaasuverkkoa tai omaa biokaasuntuotantoa (Svensen ym. 2009 Åhman 2009).

Nestemäisen biometaanin rekkakuljetus

Biometaani voidaan kuljettaa myös nestemäisenä jolloin energiasäilytys on suurempi kuin kaasulla ja kuljetusten kustannukset laskevat. Nestemäistä biometaania on tähän mennessä käytetty polttoaineena ainoastaan raskaissa ajoneuvoissa toimintasäteen kasvattamiseksi (Åhman 2009). Nestemäisen biometaanin kuljetukseen on kaksi pääasiallista syytä. Se mahdollistaa edullisemman jakelujärjestelmän alueille, joissa ei ole biokaasun tuotantoa. Toinen syy on nestemäisen biometaanin saatavuuden lisääminen, mikä parantaa erityisesti raskaiden kaasuajoneuvojen polttoaineen saatavuutta (Svensen ym. 2009).

Nestemäistä biometaania voidaan käyttää joko tankkausasemalla, joka palvelee sekä kompressoitua että nestemäistä biometaania polttoaineenaan käyttäviä autoja tai asemalla, jossa nestemäinen biometaani voidaan muuttaa takaisin kaasuksi (Åhman 2009). Nestemäinen biometaani tulee käyttää suhteellisen pian (tyypillisesti viikon kuluessa) valmistamisesta, jotta haihtumisen aiheuttamilta hävikeiltä välttyttäisiin. Nestemäisen biometaanin jakelu ei ole vielä kovin yleistä (Rutledge 2005, Åhman 2009).

2.9.2 Kaasun tankkausasemat

Kaasuautojen tankkaamiseen on kaksi perusmenetelmää, jotka ovat hidastankkaus ja nopeatankkaus. Nopeatankkausjärjestelmää käytetään yleensä julkisilla tankkausasemilla. Tankkaus kestää suunnilleen saman ajan kuin bensiinin tankkaus. Tankkauksen kesto riippuu huoltoaseman varastotankkien paineesta. Mitä korkeampi paine varastotankkeissa, sen nopeampi tankkaus (Pakkanen & Aspholm 2009). Suomessa julkiset kaasuautojen tankkausasemat käyttävät nopeatankkausta (Vainikka 2009). Nestemäisen biokaasun tankkaus on aina nopeatankkausta ja vastaa tavanomaisten nestemäisten polttoaineiden tankkausta. Nopeatankkauksen kustannuksia hidastankkaukseen verrattuna nostaa kompressorin teho, aseman kaasuvälikkeet sekä ohjauslogiikka (NSCA 2006, Pakkanen & Aspholm 2009).

Nopeatankkausta käyttävän tankkausaseman muodostaa kompressoriyksikkö apulaitteineen, suojarakennus, varastosäiliöt, autojen tankkauspisteet ja ohjausjärjestelmä. Kaasun tankkausasemalla pullopatteri tai kaasuputki kytketään kompressoriin. Kompressorin nostaa kaasun paineen noin 250 baariin. Kompressorista kaasu johdetaan tankkauspisteeseen, ja siitä edelleen autoon. Kaasun välivaraston korkea paine, maksimissaan 300 baaria nopeuttaa tankkausta. Kaasuvälikkeet koostuu kaasuvalloista tai -säiliöistä. Tankkaus tapahtuu kytkemällä kaasuletku auton kaasuliittimeen jolloin kaasusäiliöt täyttyvät (Maakaasuyhdistys r.y. 2007, Gustaffson & Stoor 2008).

Hidastankkausta käytetään yleensä esimerkiksi linja-autojen ja jätteenkeräysautojen varikoilla. Hidastankkauksessa kaasu kompressoituu tankkauksen aikana. Hidastankkaus on edullisempaa kuin nopeatankkaus, mutta kestää useita tunteja. Tämän vuoksi se soveltuu paremmin varikoille, joissa autojen tankkaus voidaan suorittaa yön aikana. Vuonna 2009 hidastankkausta ei ollut käytössä Suomessa (NSCA 2006, Pakkanen & Aspholm 2009). Kaasuauton hidastankkaukseen on myös mahdollista hankkia kotitankkauslaite (Pakkanen & Aspholm 2009, Vainikka 2009).

Kompressoitun kaasun tankkausasemat ovat kalliimpia verrattuna tavallisiin nestemäisten polttoaineiden tankkausasemiin (Åhman 2009). Euroopassa kaasuntankkausasemien investointikustannukset ovat vaihdelleet henkilöautoille tarkoitetun tankkausaseman noin 100 000-200 000 eurosta 50-100 linja-autolle tarkoitetun tankkausaseman noin miljoonaan euroon (taulukko 13).

Taulukko 13. Esimerkkejä eurooppalaisten maa- ja biokaasun tankkausasemien kustannuksista ja teknisistä ominaisuuksista (Ferré ym. 2009).

	Käyttäjät			
	Henkilöautot	12-25 jätteenkuljetusautoa	40-100 jätteenkuljetusautoa	50-100 linja-autoa
Kompressorit (lkm)	1	2	3	3
Kompressorien kapasiteetti (Nm ³ /h)	35	450	450	450
Jakelulaitteet (lkm)	1	2	2 rinnakkain	1 tankkaus-piste/linja-auto
Pinta-ala (m ²)	150-400	1000-1200	1200-1500	250 tankkausasemaa varten+varikko
Tankkausaseman investointi (1000€)	80-150	400	600	650-1 000
Rakennustekninen investointi (1000€)	30-80	100-200	200-300	-

- Ei tietoa saatavana

Biometaanin tankkausaseman paras mahdollinen sijainti riippuu paljolti asiakaskunnasta. Yleisesti aseman tulisi sijaita keskeisellä paikalla kaupunkialueella tai valtateiden risteyksessä. Myös olemassa olevat nestepolttoaineasemat ovat hyviä sijainteja. Tärkeää on, että tankkausaseman sijainti on yleisesti tiedossa, jos se ei ole välittömästi näkyvissä (Pakkanen & Aspholm 2009). Tankkausasemien lukumäärää tärkeämpi tekijä on se, että biometaania on jatkuvasti saatavilla (Svensen ym. 2009).

Tankkauspaikan sijainnilla on vaikutusta yrityksen päätökseen biokaasuautojen hankkimisesta. Tankkausaseman sijainti on erityisen merkittävässä asemassa jakeluyhtiöille, joilla on tarkat ajoreitit. Jos kysyntä liikennepolttoaineelle on suuri, eräs vaihtoehto yritykselle voi olla hankkia oma tankkausvarikko. Tällaisia yrityksiä ovat esimerkiksi linja-auto-, taksi- sekä jakeluyhtiöt. Kuitenkin, jos yrityksellä ei ole omaa biokaasuntuotantoa eikä se sijaitse kaasuputkilinjan varrella, kaasua on siirrettävä pullopattereissa, jolloin kuljetuskustannukset laskevat biometaanin käytön kannattavuutta. Oma tankkausvarikko on parempi vaihtoehto, jos yrityksellä on mahdollisuus omaan biokaasun tuotantoon. Tällaisia yrityksiä ovat esimerkiksi jätehuoltoyritykset (Pakkanen & Aspholm 2009).

2.9.3 Esimerkkejä kaasun tankkausasemista

Seuraavissa kappaleissa on esitetty esimerkkejä kaasun tankkausasemista, niiden teknisistä ominaisuuksista ja kustannuksista. Kaasun tankkausasemilla puhdistetun biokaasun varastointiin, kompressointiin ja jakeluun on käytetty erilaisia ratkaisuja. Puhdistettu biokaasu voidaan myös siirtää tankkausasemille eri tavoin, esimerkiksi

Ruotsissa biometaani siirretään sijainnista riippuen joko pullopatterikuljetuksin, paikallisella kaasuverkolla tai maakaasuverkon avulla (Ferré ym. 2009).

Tukholma, Ruotsi

Tukholmassa oli vuonna 2009 10 kaasuautojen tankkausasemaa, joista ensimmäinen on otettu käyttöön vuonna 1997. Kaasu kuljetetaan tankkausasemille vaihdettavissa ”swap-body” -konteissa, jotka on täytetty kompressoitua biometaania sisältävillä pullopattereilla. Kontit toimivat samalla tankkausasemien biokaasuvarastoina. Konttien maksimitilavuus on 1910 m³. Konteista biokaasu johdetaan kompressoriin, jossa kaasun paine nostetaan 230 baariin. Kompressorista kaasu johdetaan puskurivarastoon ja lopulta nopeatankkauslaitteisiin. Tankkausaseman rakentamisen kustannuksien on arvioitu olevan noin 330 000 € sisältäen kompressorin, kaasuvastaston ja jakelulaitteen. Lisäksi tankkausaseman laitteistojen asennus- ja tarkastuskustannukset ovat noin 55 000 € (Ferré ym. 2009).

Västerås, Ruotsi

Västeråsissa puhdistettua biokaasua käytetään 40 kaupungin linja-autossa, 10 jätteenkeräysautossa ja noin 500 kevyessä ajoneuvossa. Jätteenkäsittelylaitoksessa ja jätevedenpuhdistamolla tuotettu biokaasu siirretään biokaasun puhdistuslaitokselle 8,5 km erillisellä biokaasuputkella. Puhdistuslaitokselta biometaani kuljetetaan toisella putkella kahdeksan kilometrin päässä sijaitseville kahdelle tankkausasemalle. Toinen tankkausasema sijaitsee linja-autovarikolla, ja on tarkoitettu linja-autoille ja jätteenkuljetusautoille (kaksi tankkauslaitetta), toinen on julkinen tankkausasema yksityisautoille (yksi tankkauslaite). Julkinen tankkausasema on 100 m:n päässä linja-autovarikosta (Ferré ym. 2009).

Biometaani kompressoidaan linja-autovarikolla kahdessa kompressorissa, kumpikin kapasiteetiltaan 400 Nm³/h. Kompressoinnin jälkeen biometaani johdetaan varastoon, jonka maksimipaine on 350 baaria ja kapasiteetti noin 6000 Nm³. Varastosta biometaani johdetaan tankkausasemille, joissa autojen tankkaus tapahtuu suoraan ilman erillisen korkeapainekompressorin käyttöä. Nestemäistä maakaasua käytetään varapolttoaineena, jos biokaasun syötössä on ongelmia. Maakaasuvastaston tilavuus on 50 m³, joka riittää seitsemäksi päiväksi 40 linja-autolle (Ferré ym. 2009).

Göteborg, Ruotsi

Göteborgin alueella Länsi-Ruotsissa on investoitu biometaanin tuottamiseen ja jakeluun sekä kaasuautojen käyttöön 1990-luvun puolivälistä asti. Göteborgissa on 11 kaasun tankkausasemaa, ja kolme uutta suunnitellaan vuodelle 2010. Biometaani jaetaan tankkausasemille maakaasuverkolla. Maakaasuverkko on noin 800 km pitkä, ja sijaitsee Ruotsin länsirannikolla. Maakaasuverkon lisäksi joillain asemilla käytetään kontteja biokaasun jakeluun ja varastointiin. Processkontroll –niminen yhtiö rakentaa ja ylläpitää tankkausasemia. Yhtiö rakentaa kolmenlaisia biometaanin tankkausasemia: L-asemia, E-asemia ja linja-autojen tankkausasemia (taulukko 14). L-asemat ovat maakaasuverkkoon kytkettyjä julkisia tankkausasemia. E-asemat ovat julkisia asemia, joille biometaani tuodaan konteissa. Linja-autojen tankkausasemat on liitetty maakaasuverkkoon, mutta niihin myös tuodaan biokaasua konteissa (Ferré ym. 2009).

Taulukko 14. Göteborgin alueen biokaasun tankkausasemien teknisiä tietoja ja investointikustannukset (Ferré ym. 2009, muokattu).

	L-asema	E-asema	Linja-autojen tankkausasema
Investointi-kustannukset (€)	375 500	236 200 (kompressori + jakelulaite, ei sisällä suunnittelua)	859 200-2 685 000, riippuen linja-autojen lukumäärästä
Kaasun siirto	Maakaasun jakeluverkon putkisto (4 bar) tai siirtoverkon putkisto (28 bar)	Kompressoituja kaasupulloja kontissa, maksimitilavuus yht. 2550-3700 Nm ³ , 200 bar,	Maakaasuverkon putkisto tai putkisto ja konttipävaunu
Kompressointi	1-2 hydraulista kompressoria	1 hydraulinen kompressori	3 hydraulista kompressoria
Varastointi	4000 l vettä vastaava pullovarasto (paine 250 bar)	4000 l vettä vastaava pullovarasto (paine 200 bar)	Varastointi ei tarpeen, ainoastaan puskurivarasto
Tankkaus	Kompressointi (1. kompressori käytetään uudelleen), jakelu 230 baarin maksimipaineessa	Kompressointi (1. kompressori käytetään uudelleen), jakelu 230 baarin maksimipaineessa	Nopea tankkaus (varastointimahdollisuus) tai hidas tankkaus

Bern, Sveitsi

Vuonna 2009 Sveitsissä oli yli 7000 kaasukäyttöistä autoa ja 113 kaasuntankkausasemaa (NGVA Europe 2009). Kaikki tankkausasemat on kytketty kaasuverkkoon, joka sisältää sekä maakaasua että puhdistettua biokaasua. Bernin alueella on yhteensä 11 kaasuntankkausasemaa, joista tässä käytetään esimerkkeinä julkista tankkausasemaa (Sandrain 1), linja-autovarikkoasemaa (Eigerplatz) ja vara-asemaa (Sandrain 2) (taulukko 15) (Ferré ym. 2009).

Sandrain 1 on kevyille ajoneuvoille tarkoitettu julkinen nopeatankkausasema. Aseman kaasuväri on yhdistetty lähellä sijaitsevaan, tehokkaampaan linja-autoille tarkoitettuun nopeatankkausasemaan (Sandrain 2). Sandrain 2 rakennettiin vuonna 2007 vara-asemaksi linja-autovarikolla sijaitsevalle tankkausasemalle (Eigerplatz), ja siellä voidaan tankata 3 linja-autoa tunnissa. Eigerplatzin tankkausasema sijaitsee linja-autovarikon sisällä kaupungin keskustassa. Se rakennettiin 2006-2007. Tankkausasemalla on 54 hidastankkaus pistettä ja 2 nopeatankkaus pistettä. Kompressoitu kaasu tankataan 240 baarin maksimipaineessa. Tankkausasema on kolmessa tasossa: tankkaus pistet ovat pohjakerroksessa, kompressorit ensimmäisessä kerroksessa ja varasto on katolla.

Taulukossa 15 on yhteenveto tässä luvussa esiteltyjen kaasun tankkausasemien ominaisuuksista.

Taulukko 15. Yhteenveto esiteltyjen biokaasun tankkausasemien ominaisuuksista (Ferré ym. 2009).

	Bern, Sveitsi		Tukholma, Ruotsi		Göteborg, Ruotsi		
Käyttäjät	Linja-autot (Ei-gerplatz)	Yksityisautot (Sandrain 1)	Yksityisautot	Linja autot ja yksityisautot (Västerås)	Linja-autot	Yksityisautot (E-asema)	Yksityisautot (L-asema)
Syöttö	Maakaasuverkko 5 bar	Maakaasuverkko	Säiliöt (1910 m ³ /säiliö) 220 bar	Erillinen putkisto 4 bar	Maakaasuverkko tai erillinen kaasuverkko + säiliöt	Säiliöt 200 bar	Maakaasuverkko 4-28 bar
Kompressori	2 kompressoria	1 kompressori	1 kompressori	2 kompressoria	3 kompressoria	1 kompressori	1-2 kompressoria
Varastointi	3 pullopatteria (yksi sisältää 2x20 80 l pulloa)	Varasto tankkausasemalla, käyttää myös "Sandrain 2" linja-autojen tankkausaseman varastoa	Säiliöt (1910 m ³ /säiliö)	3 painetason varasto + LNG varavarasto (50m ³)	Puskurivarasto	4000 l vettä vastaava pullovarasto	4000 l vettä vastaava pullovarasto
Jakelu	Hidas (54 paikka) + nopea (2 jakelulaitetta) 240 bar	Nopea (1 jakelulaite) 230 bar	Nopea (2 jakelulaitetta) 230 bar	Nopea (2 jakelulaitetta linja-autoille + 1 yksityisautoille) 230 bar	Nopea tai hidas 230 bar	Nopea (1 jakelulaite) 230 bar	Nopea (1 jakelulaite) 230 bar

3 AINEISTO JA MENETELMÄT

Tässä tutkimuksessa on arvioitu Keski-Suomen liikennebiokaasupotentiaali, biokaasun puhdistuksen kustannukset eri puhdistusmenetelmillä sekä biokaasuverkon (sisältäen kaasun puhdistuksen, siirron ja jakelun) kustannukset. Tutkimuksessa on käytetty Vanttisen (2010) arvioimaa biokaasun tuotantoon sopivien materiaalien määrää Keski-Suomessa (luku 3.2). Tämän lisäksi biokaasun puhdistuksen kustannusten arviointiin on käytetty kirjallisuudesta kerättyä tietoa (luku 2.8) ja biokaasun siirron ja jakelun kustannusten arviointiin asiantuntijoilta saatua tietoa (luku 3.3.). Tutkimuksessa käytetyt laskukaavat on esitetty luvuissa 3.4 - 3.6. Menetelmällisesti tutkimus on kvantitatiivinen selvitys.

3.1 Kohdealue: Keski-Suomi

Tutkimuksen kohdealue on Keski-Suomen maakunta, johon kuuluu 23 kuntaa (kuva 12): Hankasalmi, Joutsa, Jyväskylä, Jämsä, Kannonkoski, Karstula, Keuruu, Kinnula, Kivijärvi, Konnevesi, Kuhmoinen, Kyyjärvi, Laukaa, Luhanka, Multia, Muurame, Petäjävesi, Pihtipudas, Saarijärvi, Toivakka, Uurainen, Viitasaari ja Äänekoski (Keski-Suomen liitto 2009). Keski-Suomen maapinta-ala on 16 707 km². Maakunnan väkiluku vuoden 2009 lopussa oli 272 784 (Tilastokeskus 2010a).



Kuva 12. Keski-Suomen kunnat (Keski-Suomen liitto 2009).

3.2 Biokaasuntuotannon raaka-aineet

Keski-Suomen biokaasupotentiaalin määrittämiseksi tässä työssä käytettiin Vanttisen (2010) arvioimaa biokaasun tuotantoon soveltuvien materiaalien määrää Keski-Suomessa. Määrään on laskettu mukaan kotieläinten lanta, viljojen viljelystä jäljelle jäävät oljet, viljeltävä nurmi, jätevedenpuhdistamoiden liete, yhdyskunnista erilliskerätty biojäte sekä teollisuudessa muodostuvat biohajoavat sivutuotteet. Keski-Suomessa biokaasun raaka-aineeksi soveltuvan biohajoavan materiaalin määrä on teoreettisesti tarkasteltuna noin 433 000 t TS/a (Vänttinen 2010).

Teknisesti hyödynnettävissä olevaksi biokaasun tuotantoon soveltuvan biohajoavan materiaalin määräksi Vänttinen (2010) arvioi 176 000 t TS/a (taulukko 16). Nurmen osuus on 56 %. Teknisessä tarkastelussa yhdyskuntien ja teollisuuden jätemateriaalit käytetään biokaasun tuotannossa kokonaisuudessaan sekä maataloudessa muodostuvista materiaaleista (lanta ja olki) ja biokaasun tuotantoa varten tuotettavista energiakasveista (nurmi) teknisesti hyödynnettävissä oleva osuus (Vänttinen 2010).

Vänttinen (2010) määrittä työssään kaksi mallilaitoskokoa biokaasulaitoksille. Pienen kokoluokan biokaasulaitoksen reaktorikoko on 2000 m³ ja suuren kokoluokan biokaasulaitoksen reaktorikoko on 5000 m³. Tässä työssä käytettiin samoja mallilaitoskokoja. Vanttisen työssä oletettiin, että suuren kokoluokan biokaasulaitokset hyödyntäisivät yhdyskuntien ja teollisuuden jätemateriaaleja ja pienen kokoluokan biokaasulaitoksissa käytettäisiin maatalouden materiaaleja (lantaa ja viljojen viljelystä jäljelle jäänyttä olkea) sekä energiakasveja (nurmi). Keski-Suomen teknisen biokaasupotentiaalin tuottamiseen tarvittaisiin suuren kokoluokan biokaasureaktoreita (5000 m³) neljä kappaletta. Suuren kokoluokan biokaasulaitosten osalta biokaasun tuotantoon käytettävien materiaalien kuljetusetäisyyksien arvioitiin olevan maksimissaan 50 km. Tällä kuljetussäteellä yhdyskuntien ja teollisuuden materiaalien määrät riittävät kuitenkin vain kolmen suuren kokoluokan biokaasulaitoksen kapasiteetille. Suuren kokoluokan biokaasulaitoksia olisi siis mahdollista rakentaa Jyväskylään, Jämsään ja Äänekoskelle. Maatalouden materiaaleja ja energiakasveja hyödyntäviä pienen kokoluokan biokaasureaktoreita (2000 m³) voitaisiin rakentaa 95 kappaletta (taulukko 16) (Vänttinen 2010).

Taulukko 16. Biokaasun tuotantoon soveltuvien biohajoavien materiaalien tekninen potentiaali, ja näiden perusteella arvioitujen pienen (2000 m³) ja suuren (5000 m³) kokoluokan biokaasureaktoreiden lukumäärät Keski-Suomessa (Vänttinen 2010, muokattu).

Biokaasun tuotantoon soveltuvat orgaaniset materiaalit	Materiaalin määrä (t TS/a)	Suuri kokoluokka 5000 m³ (kpl)	Pieni kokoluokka 2000 m³ (kpl)
Yhteensä	176 000		
Yhdyskuntien ja teollisuuden jätemateriaalit	19 700	4	-
-Jäteveden puhdistamoiden liete	7 400		
-Yhdyskuntien biojäte	5 200		
-Teollisuuden orgaaniset jätteet	7 100		
Maatalouden materiaalit ja energiakasvit ¹	156 600	-	95
-Lanta	43 100		
-Olki	14 700		
-Nurmi	98 800		

¹Nautaeläinten, sikojen ja siipikarjan lanta, nautaeläinten laidunnus (4 kk), lypsylehmätilojen koko yli 20 lypsylehmää / tila, lihasikarajojen koko yli 100 lihasikaa / tila, 20 % olkisadosta, 40 % peltopinta-alasta (kesanto ja hoidettu viljelemätön pelto) ja 40 % nurmen toisesta sadosta (alle viiden vuoden nurmet)

Tässä työssä arvioitiin Keski-Suomen biokaasupotentiaali sekä kuntakohtaiset biokaasun tuotantomäärät Vänttisen (2010) määrittämien suuren kokoluokan (reaktorikoko 5000 m³) biokaasulaitosten tuottaman biokaasun primäärienergian (taulukko 17) ja pienen kokoluokan (reaktorikoko 2000 m³) biokaasulaitosten kuntakohtaisten lukumäärien ja polttoainetehtojen (taulukko 18) perusteella.

Taulukko 17. Suuren kokoluokan (5000 m³) biokaasulaitosten hyödyntämät materiaalmäärät, tuotettavan kaasun primäärienergia ja polttoainetehtä (Vänttinen 2010, muokattu).

Biokaasulaitokset	Materiaalin määrä (t TS/a)	Primäärienergia (MWh/a)	Polttoainetehtä (MW/laitos)
Jyväskylä	11 100	38 100	4,5
Äänekoski	5 600	8 600	1,0
Jämsä	2 300	7 700	0,9
Yhteensä	19 000	54 400	6,4

Taulukko 18. Pienen kokoluokan (2000 m³) biokaasulaitosten kuntakohtaiset lukumäärät, polttoainetehot ja hyödynnetyn materiaalin määrä (Vänttinen 2010, muokattu).

Kunta	Materiaalin määrä	Laitosten lukumäärä	Polttoainetehto
	(t TS/a)	(kpl)	(kW/laitos)
Hankasalmi	11 000	7	480
Joutsa	6 500	4	470
Jyväskylä	10 600	7	470
Jämsä	13 300	8	540
Kannonkoski	3 600	2	530
Karstula	9 600	6	490
Keuruu	7 700	5	470
Kinnula	4 700	3	440
Kivijärvi	2 100	1	610
Konnevesi	4 800	3	490
Kuhmoinen	3 500	2	530
Kyyjärvi	4 600	3	460
Laukaa	12 200	7	540
Luhanka	1 700	1	500
Multia	2 800	2	420
Murame	1 500	1	460
Petäjävesi	4 500	3	460
Pihtipudas	12 500	7	520
Saarijärvi	15 700	9	530
Toivakka	2 600	2	400
Urainen	4 600	3	440
Viitasaari	9 000	5	550
Äänekoski	7 100	4	580
Yhteensä	156 100	95	500

Keski-Suomen biokaasun tuotantopotentiaalin arvioinnissa huomioitiin edellä esitetyn lisäksi Mustankorkea Oy:n kaatopaikalta kerätty kaatopaikkakaasu, jota vuonna 2008 kerättiin 3,1 miljoonaa Nm³ (Aho 2008).

3.3 Kaasun siirtoputkiston ja tankkausasemien kustannukset

Biokaasun siirtoputken investointikustannukset ovat noin 100 000 €/km. Käyttökustannukset ovat käytännössä olemattomat. Kaasun tankkausaseman investointi- ja käyttökustannukset riippuvat asematyypistä (hidastankkaus vai nopeatankkaus), ulkopuolisista tekijöistä (mm. imupaine, sähkö jne) ja asiakasvaatimuksista (taulukko 19) (Torri 2009).

Taulukko 19. Biometaanin tankkausasemien kustannuksia (Torri 2009).

	Varikkoasema busseille/jäteautoille/muulle raskaalle kalustolle (tankkaus klo 21-06 välillä)*	Pieni julkinen tankkausasema**
Vuosivolyymi (milj. Nm ³ _{biometaania/a})	2,5	-
Kapasiteetti (Nm ³ _{biometaania/h})	800	100 (4 bar imupaineella)
Kokonaisinvestointi (sis. tekniikka, rakentaminen, projekti) (milj. €)	1,2	0,6
Käyttökustannukset (snt/Nm ³ _{biometaania})	10	20

- Ei tietoja saatavana

*Vaatii kapasiteetin hyvää käyttöastetta, suurehkoa imupainetta ja hyvin valittua tekniikkaa

**Vaatii kapasiteetin hyvää käyttöastetta ja hyvin valittua tekniikkaa

3.4 Keski-Suomen biokaasupotentiaalin ja biokaasun puhdistuslaitosten lukumäärän määrittäminen

Keski-Suomessa tuotettavissa olevan biokaasun määrän määrittämiseksi laskettiin ensin pienen kokoluokan (2000 m³) biokaasulaitosten (taulukko 18) vuosittain tuottaman biokaasun primäärienergia kaavalla 1:

$$E = P * t \quad (1),$$

jossa E = biokaasulaitoksella tuotetun biokaasun primäärienergia (MWh)

P = yksittäisen biokaasulaitoksen polttoaineteho (MW)

t = laitoksen oletettu käyttöaika 8520 h.

Tämän jälkeen sekä pienen että suuren (taulukko 17) kokoluokan biokaasulaitoksissa vuosittain tuotettavissa olevasta biokaasun primäärienergiasta laskettiin sekä biokaasun että biometaanin määrä (Nm³/a) sillä oletuksella, että raakabiokaasun metaanipitoisuus on 60 %. Biometaanin energiasisältö on noin 10 kWh/Nm³ (European Biomass Association 2009). Biokaasun metaanipitoisuudeksi arvioitiin 60 %, koska laitosten käyttämien raaka-aineiden jakaumaa ei ollut määritetty. Keski-Suomessa tuotettavissa olevan biokaasun kokonaismäärään laskettiin pienen ja suuren kokoluokan biokaasulaitosten tuottama biokaasu sekä Mustankorkea Oy:n kaatopaikalla muodostuva kaatopaikkakaasu.

Lisäksi arvioitiin tuotettavissa olevalla biometaanilla ajavien henkilöautojen lukumäärä. Oletuksena käytettiin, että henkilöautojen käyttö pysyy samana kuin vuonna 2008, jolloin yhdellä henkilöautolla ajettiin keskimäärin 16 800 km/a (Tiehallinto 2009). Henkilöauton biometaaninkulutuksena käytettiin Volkswagen Passat Variant TSI Ecofuel -kaasuauton metaaninkulutusta 6,2 Nm³/100 km (4,4 kg/100 km) (Volkswagen 2010). Biokaasulla vuosittain ajavien henkilöautojen lukumäärä laskettiin kaavalla 2:

$$n = \frac{x * \eta}{y * z} \quad (2),$$

jossa n = henkilöautojen lukumäärä

x = vuosittain tuotettavissa olevan biometaanin määrä (Nm³)

η = arvioitu 0,98 hyötysuhde puhdistusprosessissa (Persson 2003)

y = henkilöautolla keskimäärin vuodessa ajettavat kilometrit 16 800 km (Tiehallinto 2009)

z = kaasuauton metaaninkulutus $6,2 \text{ Nm}^3/100 \text{ km}$ (Volkswagen 2010).

Biokaasun puhdistuslaitosten lukumäärää arvioitiin jakamalla tuotettavissa olevan biokaasun määrä (Nm^3/h) erikokoisten (50, 100, 250, 500, 1000, 1500 ja 2000 $\text{Nm}^3_{\text{biokaasua}}/\text{h}$) biokaasun puhdistuslaitosten kapasiteeteilla. Biokaasun puhdistuslaitoksen käyttöajaksi oletettiin 8520 h/a.

3.5 Biokaasun puhdistuksen kustannusten määrittäminen

3.5.1 Keski-Suomen biokaasupotentiaalin puhdistuksen kustannukset

Biokaasun puhdistuksen investointikustannuksia arvioitiin neljän ja kokonaiskustannuksia viiden eri puhdistuslaitteistovalmistajan eri puhdistusmenetelmiä (PSA, vesiabsorptio, kemiallinen absorptio) käytävillä ja erikokoisilla puhdistuslaitosvaihtoehdoilla taulukoiden 9 ja 12 tietojen perusteella (luku 2.8). Oletuksena oli, että kaikki Keski-Suomessa tuotettava biokaasu puhdistettaisiin samankokoisissa puhdistuslaitoksissa. Puhdistuslaitosten investointikustannukset laskettiin kertomalla Keski-Suomen biokaasupotentiaalin puhdistukseen vaadittava puhdistuslaitosten lukumäärä tietyssä kokoluokassa valmistajien ilmoittamalla puhdistuslaitosten investointikustannuksilla (€). Biokaasun puhdistuksen kokonaiskustannukset (sisältää sekä pääoma- että käyttökustannukset, 15 vuoden takaisinmaksuaika, 6 % korko) laskettiin kertomalla vuosittain tuotettavissa olevan biometaanin energiamäärä (kWh) puhdistuslaitteistovalmistajien ilmoittamalla biokaasun puhdistuksen kokonaiskustannuksilla ($\text{snt}/\text{kWh}_{\text{biometaania}}$).

Keski-Suomessa tuotettavissa olevan biokaasun metaanipitoisuudeksi on edellisessä luvussa arvioitu 60 %. Puhdistuslaitteistovalmistajien ilmoittamissa kustannustiedoissa biokaasun metaanipitoisuudeksi on asetettu 53 % (Urban ym. 2008). Olettaen, että Keski-Suomessa tuotettavan biokaasun metaanipitoisuus on 60 %, puhdistuksen kustannukset ovat jonkun verran tässä työssä esitettyjä pienemmät. Puhdistetun kaasun metaanipitoisuus on puhdistuslaitteistovalmistajien mukaan 97 %, mikä täyttää esimerkiksi Ruotsin asettaman laatuvaatimuksen liikennebiokaasulle (Persson & Wellinger 2006, Urban ym. 2008).

3.5.2 Biokaasun puhdistuksen kustannusten kuntakohtainen arvio

Biokaasun puhdistuksen kustannusten kuntakohtaista arviointia varten laskettiin ensin jokaisen kunnan biokaasun tuotantopotentiaali luvussa 3.4 esitetysti. Jyväskylän, Äänekosken ja Jämsän biokaasun tuotantoon laskettiin yhteen sekä yhdyskuntien ja teollisuuden jätemateriaaleista että maatalouden materiaaleista (lanta ja olki) ja energiakasveista (nurmi) tuotettu biokaasu. Jyväskylän biokaasun tuotantoon laskettiin mukaan myös Mustankorkea Oy:n kaatopaikan kaatopaikkakaasu. Muiden kuntien biokaasuntuotanto koostuu yksinomaan maatalouden materiaaleista tuotetusta biokaasusta.

Jokaisessa kunnassa vuosittain tuotettavissa olevan biokaasun määrän perusteella määriteltiin tarvittavan biokaasun puhdistuslaitoksen koko. Laitoksen koko valittiin siten, että sen kapasiteetti olisi mahdollisimman lähellä kunnan biokaasun tuotannon määrää, mutta ei kuitenkaan ylittäisi sitä. Kunnan biokaasun puhdistuksen investointi- ja kokonaiskustannukset määritettiin taulukoista 9 ja 12 (luku 2.8.) puhdistuslaitoksen koon mukaan eri puhdistusmenetelmien keskiarvon perusteella.

Laskelmat tehtiin kunnille, joiden biokaasun tuotantopotentiaali ylitti 250 Nm³/h, koska saatavilla olevat puhdistuslaitosten kustannustiedot alkavat tästä kokoluokasta. Lisäksi biokaasun puhdistuksen kustannukset nousevat voimakkaasti puhdistuslaitoksen koon pienentyessä.

Jokaiselle kunnalle laskettiin myös biometaania polttoaineena käyttävien henkilöautojen lukumäärä/vuosi, mikä olisi mahdollista saavuttaa kussakin kunnassa tuotettavissa olevalla biokaasulla (kaava 2).

3.6 Keski-Suomen biokaasuverkon kustannusten määrittäminen

Biokaasuverkon eli biokaasun puhdistuksen, siirron ja tankkausasemien investointi-, käyttö- ja kokonaiskustannukset arvioitiin neljälle vaihtoehdolle. Vaihtoehdossa A oletettiin, että kaikki Keski-Suomen biokaasu käytettäisiin liikennepolttoaineena, ja puhdistettaisiin 19:ssä 500 Nm³/h biokaasua käsittelevässä laitoksessa. Vaihtoehdossa B kaikki biokaasu puhdistettaisiin viidessä 2000 Nm³/h biokaasua käsittelevässä laitoksessa. Vaihtoehdossa C oletettiin, että biokaasua puhdistettaisiin liikennepolttoaineeksi kuntakohtaisesti vain niissä kunnissa, joissa biokaasun tuotantopotentiaali riittää 500 Nm³/h biokaasua käsittelevälle tai suuremmalle puhdistuslaitokselle (kahdeksan puhdistuslaitosta). Vaihtoehdossa D oletettiin, että ainoastaan teollisuuden ja yhdyskuntien jättemateriaaleista tuotettu biokaasu käytettäisiin liikennepolttoainetuotantoon, ja puhdistettaisiin kahdessa 500 Nm³/h biokaasua käsittelevässä laitoksessa. Biokaasun puhdistuslaitosten investointi- ja käyttökustannuksina käytettiin keskiarvoja kaikkien puhdistusmenetelmien tietyn laitoksen kustoista (taulukot 9 ja 11, luku 2.8) (Urban ym. 2008).

Biokaasun puhdistuslaitosten vuosittain tuottaman biometaanin kokonaisenergia laskettiin kaavalla 3:

$$b = \frac{c * t * d * \eta * e * f}{1000000} \quad (3),$$

jossa b = tuotetun biometaanin kokonaisenergia (GWh)

c = biokaasun puhdistuslaitoksen kapasiteetti (Nm³_{biokaasua}/h)

t = laitoksen oletettu vuotuinen käyttöaika 8520 h

d = biokaasun metaanipitoisuus 60 %

η = arvioitu 0,98 hyötysuhde puhdistusprosessissa (Persson 2003)

e = biometaanin energiasäilytys 10 kWh/Nm³

f = biokaasun puhdistuslaitosten lukumäärä.

Tankkausasemien investointi- ja käyttökustannukset laskettiin kahdella vaihtoehdolla. Ensimmäisessä vaihtoehdossa biokaasuverkkojen kaikki tankkausasemat ovat kapasiteetiltaan 100 Nm³_{biometaania}/h julkisia tankkausasemia, jolloin yhden tankkausaseman investointikustannuksena käytettiin 600 000 € ja käyttökustannuksena 20 snt/Nm³_{biometaania} (Torri 2009). Toisessa vaihtoehdossa kaikkien tankkausasemien kapasiteetiksi oletettiin 500 Nm³_{biometaania}/h, jolloin yhden tankkausaseman investointikustannukseksi arvioitiin 1,2 miljoonaa € ja käyttökustannukseksi 10 snt/Nm³_{biometaania}. Vaihtoehtojen A-D tankkausasemien lukumäärä laskettiin kaavalla 4:

$$g = \frac{c * t * f * d * \eta}{i * j} \quad (4),$$

jossa g = tankkausasemien lukumäärä

c = biokaasun puhdistuslaitoksen kapasiteetti (Nm³_{biokaasua}/h)

t = biokaasun puhdistuslaitoksen oletettu vuotuinen käyttöaika 8520 h
 f = biokaasun puhdistuslaitosten lukumäärä
 d = biokaasun metaanipitoisuus 60 %
 η = arvioitu 0,98 hyötysuhde puhdistusprosessissa (Persson 2003)
 i = kaasun tankkausaseman oletettu vuotuinen käyttöaika 8760 h
 j = tankkausaseman kapasiteetti ($\text{Nm}^3_{\text{biometaania/h}}$)

Tankkausasemien investointikustannukset laskettiin vaihtoehdoille A-D tankkausasemien lukumäärän perusteella. Tankkausasemien vuosittaiset käyttökustannukset laskettiin kaavalla 5:

$$k = \frac{j * i * l}{100} * g \quad (5),$$

jossa k = kaasun tankkausasemien vuosittaiset käyttökustannukset (€/a)
 j = kaasun tankkausaseman kapasiteetti ($\text{Nm}^3_{\text{biometaania/h}}$)
 i = kaasun tankkausaseman oletettu vuotuinen käyttöaika 8760 h
 l = tankkausaseman käyttökustannus (snt/ $\text{Nm}^3_{\text{biometaania}}$)
 g = tankkausasemien lukumäärä

Kaikissa vaihtoehdoissa (A-D) oletettiin, että jokaista tankkausasemaa kohden rakennettaisiin kolme kilometriä kaasun siirtoputkea puhdistetun biokaasun siirtämiseksi puhdistuslaitokselta tankkausasemalle. Siirtoputken hintana käytettiin 100 000 €/km. Siirtoputkiston käyttökustannukset ovat käytännössä olemattomat (Torri 2009).

Biokaasuverkkovaihtoehtojen kokonaiskustannusten määrittelyä varten oletettiin investoinneille 15 vuoden takaisinmaksuaika ja 6 % korko. Investoinnit on oletettu rahoitettavan lainarahalla. Kokonaiskustannukset laskettiin annuiteettimenetelmällä, kaavalla 6:

$$m = \frac{o(1+o)^p}{(1+o)^p - 1} * q + r \quad (6),$$

jossa m = vuosikustannukset
 o = korkokanta
 p = investoinnin laskenta-aika vuosina
 q = hankintameno
 r = vuosittaiset juoksevat kustannukset.

Lisäksi jokaiselle vaihtoehdolle laskettiin biometaania polttoaineena käyttävien henkilöautojen lukumäärä/vuosi, mikä olisi mahdollista saavuttaa kussakin vaihtoehdossa tuotetulla biometaanilla (kaava 2).

4 TULOKSET

4.1 Keski-Suomen biokaasupotentiaali ja biokaasun puhdistuslaitosten lukumäärä

Keski-Suomen alueella olisi mahdollista tuottaa noin 80 miljoonaa Nm^3 biokaasua vuodessa. Biometaanina tämä vastaa noin 48 miljoonaa Nm^3/a , olettaen että biokaasun metaanipitoisuus on noin 60 %. Biokaasusta 85 % tuotettaisiin maatalouden materiaaleista (lanta ja olki) ja energiakasveista (nurmi) (taulukko 20). Biokaasusta 11 % tuotettaisiin teollisuuden ja yhdyskuntien jätemateriaaleista. Mustankorkea Oy:n kaatopaikalta kerätty kaatopaikkakaasu muodostaisi noin 4 % biokaasusta, jos kaatopaikkakaasun tuotto pysyisi samana kuin vuonna 2008. Biokaasun primäärienergia olisi noin 480 GWh vuodessa. Jos

koko biokaasupotentiaali hyödynnettäisiin liikennepolttoaineena, tuotetulla biometaanilla voisi ajaa noin 45 000 henkilöautoa vuodessa.

Taulukko 20. Keski-Suomessa tuotettavissa olevan biokaasun määrä (tekninen potentiaali).

	Biokaasua (milj. Nm ³ /a)	Primäärienergia (GWh/a)
Pienen kokoluokan biokaasulaitokset (maatalouden materiaalit ja energiakasvit)	67,6	405,6
Suuren kokoluokan biokaasulaitokset (teollisuuden ja yhdyskuntien jättemateriaalit)	9,1	54,4
Mustankorkea Oy:n kaatopaikkakaasu	3,1	18,6
Yhteensä	79,8	478,6

Keski-Suomen biokaasun tuotantopotentiaalin perusteella arvioitiin biokaasun puhdistuslaitosten määriä (taulukko 21). Jos kaikki biokaasu puhdistettaisiin samankokoisissa puhdistuslaitoksissa, biokaasun puhdistukseen tarvittaisiin 19 kappaletta 500 Nm³_{biokaasua}/h käsittelevää puhdistuslaitosta. Jos biometaanin tuotantoon käytettäisiin 2000 Nm³_{biokaasua}/h biokaasua käsitteleviä puhdistuslaitoksia, biokaasun puhdistukseen tarvittaisiin viisi laitosta. Oletettavaa kuitenkin on, että puhdistukseen käytettäisiin erikokoisia laitoksia.

Taulukko 21. Keski-Suomen teknisen biokaasupotentiaalin puhdistukseen tarvittavien biokaasun puhdistuslaitosten lukumäärät.

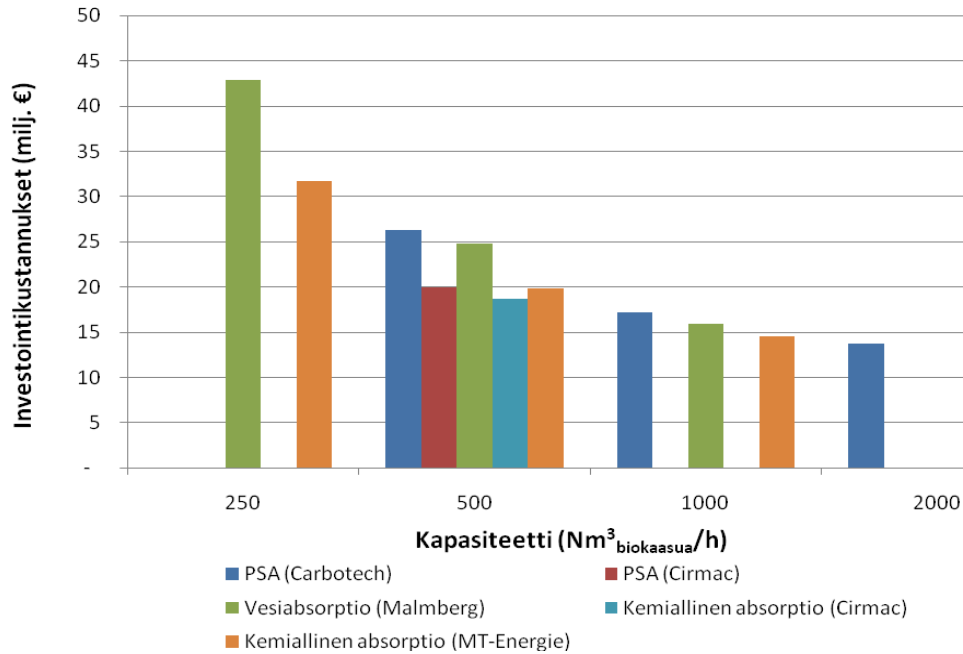
Puhdistuslaitoksen kapasiteetti (Nm ³ _{biokaasua} /h)	50	100	250	500	1000	1500	2000
Laitosten lukumäärä (kpl)	187	94	37	19	9	6	5

4.2 Biokaasun puhdistuksen investointi- ja kokonaiskustannukset

4.2.1 Keski-Suomen biokaasupotentiaalin puhdistuksen kustannukset

Keski-Suomen biokaasupotentiaalin puhdistuksen kustannuksia eri laitosten arvioitiin taulukossa 21 esitettyjen puhdistuslaitosten lukumäärien perusteella. Oletuksena käytettiin, että kaikki biokaasu puhdistettaisiin samankokoisissa laitoksissa.

Keski-Suomessa tuotettavissa olevan biokaasun puhdistuksen investointikustannukset ovat sitä pienemmät mitä suurempia puhdistuslaitoksia käytetään (kuva 13). Tällöin puhdistuslaitoksia tarvitaan myös määrällisesti vähemmän. Jos biokaasu puhdistettaisiin 500 Nm³_{biokaasua}/h käsittelevillä laitoksilla, olisivat puhdistuslaitosten investointikustannukset 18,7-26,4 miljoonaa euroa puhdistustekniikasta ja laitevalmistajasta riippuen (taulukko 22). Puhdistusmenetelmänä kemiallinen absorptio on tämän kokoluokan laitoksilla investointikustannuksiltaan edullisin. Jos biokaasu puhdistettaisiin PSA-prosessilla (Carbotech) 2000 Nm³_{biokaasua}/h käsittelevillä laitoksilla, olisivat investointikustannukset alle 14 miljoonaa euroa.



Kuva 13. Keski-Suomessa tuotettavissa olevan biokaasun puhdistuksen investointikustannukset (milj. €) eri puhdistusmenetelmillä erikokoisissa puhdistuslaitoksissa.

Taulukko 22. Keski-Suomessa tuotettavissa olevan biokaasun puhdistuksen investointikustannukset (milj. €) erikokoisilla puhdistuslaitoksilla.

Puhdistusmenetelmä (valmistaja)	Puhdistuslaitoksen kapasiteetti (Nm ³ biokaasua/h) ja laitosten lukumäärä			
	250 37 kpl	500 19 kpl	1000 9 kpl	2000 5 kpl
PSA (Carbotech)	-	26,4	17,2	13,7
PSA (Cirmac)	-	20,0	-	-
Vesiabsorptio (Malmberg)	42,9	24,8	15,9	-
Kemiallinen absorptio (Cirmac)	-	18,7	-	-
Kemiallinen absorptio (MT-Energie)	31,7	19,8	14,6	-

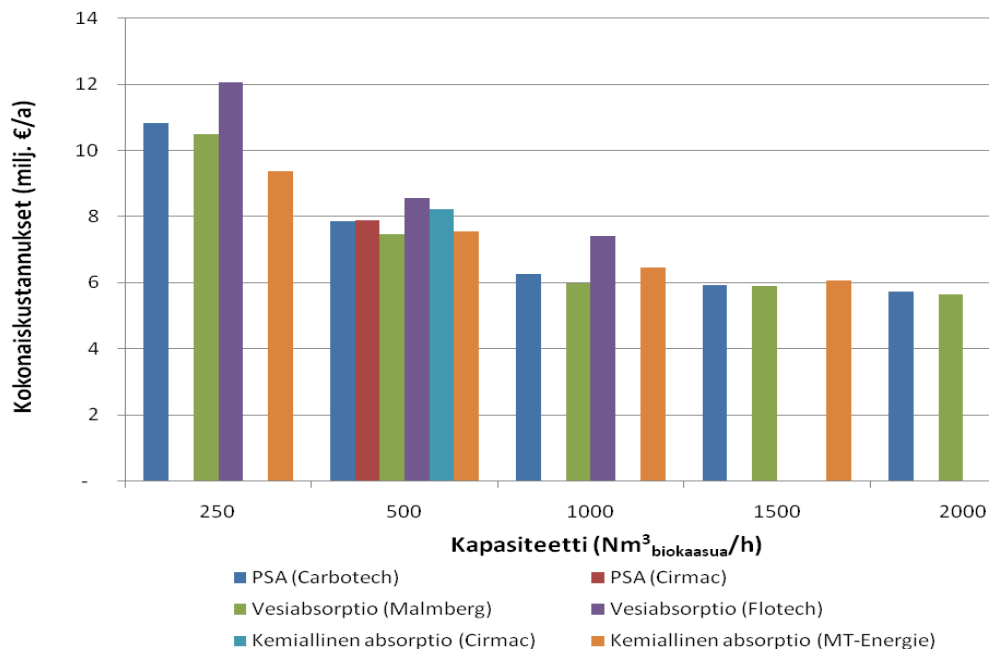
- Ei tietoja saatavana

Keski-Suomessa tuotettavissa olevan biokaasun puhdistuksen kokonaiskustannukset (sisältää pääoma- ja käyttökustannukset) ovat noin 6-11 miljoonaa euroa vuodessa puhdistuslaitosten kapasiteetista riippuen (taulukko 23). Mitä pienempiä puhdistuslaitoksia käytetään, sitä suuremmat ovat biokaasun puhdistuksen kokonaiskustannukset (kuva 14). Jos kaikki biokaasu puhdistettaisiin 500 Nm³ biokaasua/h käsittelevillä laitoksilla, olisivat puhdistuksen kokonaiskustannukset keskimäärin 8 milj. €/a. Puhdistuksen kokonaiskustannukset olisivat noin 6 milj. €/a, jos kaikki tuotettavissa oleva biokaasu puhdistettaisiin 1000-2000 Nm³/h käsittelevillä laitoksilla. Biokaasun puhdistuksen kokonaiskustannukset olisivat suurimmat, jos käytettäisiin 250 Nm³ biokaasua/h käsitteleviä laitoksia (9-12 milj. €/a). Kokonaiskustannuksissa suurimmat erot ovat eri valmistajien välillä puhdistusmenetelmästä riippumatta.

Taulukko 23. Keski-Suomessa tuotettavissa olevan biokaasun puhdistuksen kokonaiskustannukset (milj. €/a) erikokoisilla puhdistuslaitoksilla.

Puhdistusmenetelmä (valmistaja)	Puhdistuslaitoksen kapasiteetti ($\text{Nm}^3_{\text{biokaasua/h}}$) ja laitosten lukumäärä				
	250 37 kpl	500 19 kpl	1000 9 kpl	1500 6 kpl	2000 5 kpl
PSA (Carbotech)	10,8	7,8	6,3	5,9	5,7
PSA (Cirmac)	-	7,9	-	-	-
Vesiabsorptio (Malmberg)	10,5	7,5	6,0	5,9	5,6
Vesiabsorptio (Flotech)	12,1	8,6	7,4	-	-
Kemiallinen absorptio (Cirmac)	-	8,2	-	-	-
Kemiallinen absorptio (MT-Energie)	9,4	7,6	6,5	6,1	5,9

- Ei tietoja saatavana



Kuva 14. Keski-Suomessa tuotettavissa olevan biokaasun puhdistuksen kokonaiskustannukset (milj. €/a) eri puhdistusmenetelmillä erikokoisissa puhdistuslaitoksissa.

4.2.2 Biokaasun puhdistuksen kuntakohtaiset kustannukset

Keski-Suomen 23 kunnasta 11:ssä tekninen biokaasupotentiaali ylittää 250 Nm^3/h (taulukko 24). Myös Konnevesi, jonka tekninen biokaasupotentiaali on 245 Nm^3/h , otettiin mukaan tarkasteluun. Joutsaan, Keuruulle, Konnevedelle ja Viitasaarelle voitaisiin sijoittaa 250 $\text{Nm}^3_{\text{biokaasua/h}}$ käsitteleviä puhdistuslaitoksia. Hankasalmen, Jämsän, Karstulan, Laukaan, Pihtiputaan, Saarijärven ja Äänekosken biokaasupotentiaali riittäisi kuhunkin kuntaan sijoitettavaan 500 $\text{Nm}^3_{\text{biokaasua/h}}$ käsittelevään puhdistuslaitokseen. Yksi 1500 $\text{Nm}^3_{\text{biokaasua/h}}$ käsittelevä puhdistuslaitos sijoitettaisiin Jyväskylään. Tällöin koko Keski-Suomeen sijoitettavien biokaasun puhdistuslaitosten investointikustannukset olisivat noin 15 miljoonaa euroa ja biokaasun puhdistuksen kokonaiskustannukset noin 5 milj. €/a. Tällöin Keski-Suomessa tuotettavissa olevalla biometaanilla ajaisi noin 28 800 henkilöautoa vuodessa.

Taulukko 24. Keski-Suomen kuntien tekninen biokaasun tuotantopotentiaali, biokaasun puhdistuksen kustannukset ja metaanikäyttöiset autot
 * Laitoskoko pienempi kuin 250 m³/h, ¹Lähteistä saatuihin eri kokoluokan investointikustannuksiin perustuva arvio.

Kunta	Materiaalin määrä	Polttoaineteho yhteensä	Biokaasua yhteensä	Biokaasun puhdistuslaitoksen kapasiteetti esim.	Biokaasun puhdistuslaitoksen investointikustannus	Biokaasun puhdistuksen kokonaiskustannus	Biokaasun puhdistuksen kokonaiskustannus	Biometaanin käyttävät henkilöautot
	(t TS / vuosi)	(MW)	(Nm ³ /h)	(Nm ³ biokaasua/h)	(milj. €)	(1000 €/a)	(€/Nm ³ biometaanin)	(Kpl/a)
Hankasalmi	11 000	3,4	560	500	1,17	435	0.17	2 400
Joutsa	6 500	1,9	313	250	1,00	293	0.22	1 200
Jyväskylä	21 700	9,9	1657	1500	2,50 ¹	983	0.13	7 200
Jämsä	15 600	5,2	871	500	1,17	435	0.17	2 400
Kannonkoski	3 600	1,1	177	*				
Karstula	9 600	2,9	490	500	1,17	435	0.17	2 400
Keuruu	7 700	2,4	392	250	1,00	293	0.22	1 200
Kinnula	4 700	1,3	220	*				
Kivijärvi	2 100	0,6	102	*				
Konnevesi	4 800	1,5	245	250	1,00	293	0.22	1 200
Kuhmoinen	3 500	1,1	177	*				
Kyyjärvi	4 600	1,4	230	*				
Laukaa	12 200	3,8	630	500	1,17	435	0.17	2 400
Luhanka	1 700	0,5	83	*				
Multia	2 800	0,8	140	*				
Muurame	1 500	0,5	77	*				
Petäjävesi	4 500	1,4	230	*				
Pihtipudas	12 500	3,6	607	500	1,17	435	0.17	2 400
Saarijärvi	15 700	4,8	795	500	1,17	435	0.17	2 400
Toivakka	2 600	0,8	133	*				
Uurainen	4 600	1,3	220	*				
Viitasaari	9 000	2,8	458	250	1,00	293	0.22	1 200
Äänekoski	12 700	3,3	555	500	1,17	435	0.17	2 400
Yhteensä	175 200	56,2	9361	6000	14,7	5 204		28 800

4.3 Keski-Suomen biokaasuverkon kustannukset

4.3.1 Biokaasun puhdistus

Jos kaikki Keski-Suomessa tuotettavissa oleva biokaasu puhdistettaisiin 500 Nm³_{biokaasua}/h käsittelevissä laitoksissa (476 GWh/a, vaihtoehto A), biokaasun puhdistuslaitosten investointikustannukset olisivat yhteensä 22,8 miljoonaa euroa ja käyttökustannukset 4,2 milj. €/a (taulukko 25). Jos biokaasun puhdistukseen käytettäisiin kapasiteetiltaan suurempia (2000 Nm³/h) puhdistuslaitoksia (501 GWh/a, vaihtoehto B), olisivat sekä investointikustannukset (14,5 milj. €) että käyttökustannukset (3,4 milj. €/a) pienemmät.

Jos biokaasua puhdistettaisiin liikennepolttoaineeksi kuntakohtaisesti vain niissä kunnissa joissa biokaasun tuotanto ylittää 500 Nm³_{biokaasua}/h (252 GWh/a, vaihtoehto C), biokaasun puhdistuksen investointikustannukset olisivat 10,9 milj. € ja käyttökustannukset 1,9 milj. €/a. Jos taas biokaasun tuotantoon käytettäisiin ainoastaan Keski-Suomessa muodostuvat yhdyskuntien ja teollisuuden jätemateriaalit (50 GWh/a, vaihtoehto D), olisivat biokaasun puhdistuksen kustannukset 2,3 milj. € ja käyttökustannukset 0,4 milj. €/a.

Taulukko 25. Keski-Suomessa tuotettavissa olevan biokaasun puhdistuksen investointi- ja käyttökustannukset vaihtoehdoilla A-D, sekä vaihtoehtojen A-D tuottamalla biometaanilla ajavien metaanikäyttöisten henkilöautojen lukumäärä/vuosi.

	Puhdistuslaitok- sen kapasiteetti	Laitosten lkm	Tuotettu kok. energiamäärä	Investointikustan- nukset	Käyttökustan- nukset	Metaanikäyttöisiä autoja
	(Nm ³ _{biokaasua} /h)	(kpl)	(GWh/a)	(milj. €)	(milj. €/a)	(lkm/a)
Vaihtoehto A K-Suomen tekninen potentiaali	500	19	476	22,8	4,2	45 700
Vaihtoehto B K-Suomen tekninen potentiaali	2000	5	501*	14,5	3,4	48 100
Vaihtoehto C Kuntien tek- ninen potentiaali	500 1500	7 1	252	10,9	1,9	24 000
Vaihtoehto D Teollisuuden ja yhdyskuntien jättemateriaalit	500	2	50	2,4	0,4	4 800

* Laskennallinen primäärienergia, Keski-Suomessa tuotettavissa olevan biometaanin tekninen potentiaali on 480 GWh

4.3.2 Puhdistetun biokaasun siirto ja kaasun tankkausasemat

Jos kaikki Keski-Suomessa tuotettavissa oleva biokaasu puhdistettaisiin liikennepolttoaineeksi (vaihtoehdot A ja B), ja puhdistetun biokaasun tankkausta varten rakennettaisiin kapasiteetiltaan $100 \text{ Nm}^3_{\text{biometaania}}/\text{h}$ julkisia tankkausasemia, tarvittaisiin tankkausasemia yli 50 kappaletta (taulukko 26). Tankkausasemien investointikustannukset olisivat yli 30 miljoonaa euroa ja käyttökustannukset noin 10 milj. €/a. Jos biokaasua puhdistettaisiin liikennepolttoaineeksi kuntakohtaisesti vain niissä kunnissa joissa biokaasun tuotanto ylittää $500 \text{ Nm}^3_{\text{biokaasua}}/\text{h}$ (vaihtoehto C), tarvittaisiin kapasiteetiltaan $100 \text{ Nm}^3_{\text{biometaania}}/\text{h}$ tankkausasemia 29 kappaletta. Tässä vaihtoehdossa tankkausasemien investointikustannukset olisivat noin 17 milj. € ja käyttökustannukset viisi miljoonaa €/a. Jos ainoastaan Keski-Suomessa muodostuvista yhdyskuntien ja teollisuuden jättemateriaaleista tuotettu biokaasu puhdistettaisiin liikennepolttoaineeksi (vaihtoehto D), pieniä julkisia tankkausasemia ($100 \text{ Nm}^3_{\text{biometaania}}/\text{h}$) tarvittaisiin kuusi kappaletta. Investointikustannukset olisivat 3,6 milj. € ja käyttökustannukset 1,1 milj. €/a.

Jos biokaasuverkkojen tankkausasemat olisivatkin kapasiteetiltaan $500 \text{ Nm}^3_{\text{biometaania}}/\text{h}$, tarvittaisiin tankkausasemia kaikissa vaihtoehdoissa huomattavasti vähemmän (vaihtoehdoissa A ja B yli 50 sijaan 11 kappaletta). Tankkausasemien investointikustannukset yhteensä olisivat tällöin alle puolet ja käyttökustannukset noin puolet pienempien tankkausasemien yhteenlasketuista kustannuksista.

Kaikissa vaihtoehdoissa jokaista kaasun tankkausasemaa kohden rakennettaisiin kolme kilometriä kaasun siirtoputkea puhdistetun biokaasun siirtämiseksi puhdistuslaitokselta tankkausasemalle. Tällöin tankkausasemien lukumäärä määrittelee siirtoputkiston kokonaispituuden ja biokaasun siirron kustannukset. Jos kaikki Keski-Suomessa tuotettavissa oleva biokaasu puhdistettaisiin 19:ssä $500 \text{ Nm}^3_{\text{biokaasua}}/\text{h}$ käsittelevässä laitoksessa (vaihtoehto A) ja tankkausasemien kapasiteetti olisi $100 \text{ Nm}^3_{\text{biometaania}}/\text{h}$, olisi siirtoputkiston investointikustannus 16,2 milj. € (taulukko 26). Siirtoputkiston investointikustannukset laskisivat 3,3 miljoonaan euroon jos tankkausasemien kapasiteetti olisi $500 \text{ Nm}^3_{\text{biometaania}}/\text{h}$. Kapasiteetiltaan suurempia tankkausasemia käyttämällä biokaasun siirtoputkistoa tarvitaan vähemmän, jolloin kaasun siirron investointikustannukset laskevat.

Taulukko 26. Biokaasun siirron ja kaasun tankkausasemien kustannukset vaihtoehdoilla A-D. Laskelmissa oletettu, että siirtoputkea on 3 km jokaista tankkausasemaa kohti puhdistetun biokaasun siirtämiseksi puhdistuslaitokselta tankkausasemalle ja tankkausaseman kapasiteetti on joko 100 Nm³ biometaania/h tai 500 Nm³ biometaania/h.

	Tuotetun biometaanin energia	Tank- kausasemien kapasiteetti	Tank- kausasemien lukumäärä	Tank- kausasemien investointikus- tannukset yh- teensä	Tank- kausasemien käyttökustan- nukset yh- teensä	Siirtoputkea yhteensä	Siirtoputkiston investointikus- tannus yh- teensä
	(GWh/a)	(Nm ³ biometaania/h)	(kpl)	(milj. €)	(milj. €/a)	(km)	(milj. €)
Vaihtoehto A K-Suomen tekninen potentiaali	476	100 500	54 11	32,4 13,2	9,5 4,8	162 33	16,2 3,3
Vaihtoehto B K-Suomen tekninen potentiaali	501*	100 500	57 11	34,2 13,2	10,0 4,8	171 33	17,1 3,3
Vaihtoehto C Kuntien tekninen potentiaali	252	100 500	29 6	17,4 7,2	5,1 2,6	87 18	8,7 1,8
Vaihtoehto D Teollisuu- den ja yhdyskuntien jä- temateriaalit	50	100 500	6 1	3,6 1,2	1,1 0,4	18 3	1,8 0,3

* Laskennallinen primäärienergia, Keski-Suomessa tuotettavissa olevan biometaanin tekninen potentiaali on 480 GWh

4.3.3 Koko biokaasuverkko

Jos kaikki Keski-Suomessa tuotettavissa oleva biokaasu puhdistettaisiin liikennepolttoaineeksi neljässä 2000 Nm³_{biokaasua}/h käsittelevässä laitoksessa (vaihtoehto B) ja tankkausasemien kapasiteetti olisi 100 Nm³_{biometaania}/h, olisivat koko biokaasuverkon (sisältää biokaasun puhdistuksen, puhdistetun kaasun siirron, ja kaasun tankkausasemat) investointikustannukset 65,8 milj. € ja käyttökustannukset 13,4 milj. € (taulukko 27). Jos sama määrä biokaasua puhdistettaisiin 19:ssä 500 Nm³_{biokaasua}/h käsittelevässä laitoksessa (vaihtoehto A), olisivat biokaasuverkon investointikustannukset yli viisi miljoonaa euroa suuremmat. Käyttökustannukset olisivat lähes samansuuruiset.

Jos biokaasu puhdistettaisiin liikennepolttoaineeksi kuntakohtaisesti vain niissä kunnissa, joissa biokaasun tuottopotentiaali on vähintään 500 Nm³/h (vaihtoehto C), olisivat sekä biokaasuverkon investointi- että käyttökustannukset noin puolet vaihtoehto B:n kustannuksista. Tosin tuotetun biometaanin energiamääräkin olisi vain puolet verrattuna tilanteeseen, jossa maakunnan koko biokaasupotentiaalista tuotettaisiin liikennepolttoainetta (vaihtoehdot A ja B). Jos ainoastaan Keski-Suomessa muodostuvista teollisuuden ja yhdyskuntien orgaanisista jätemateriaaleista tuotettu biokaasu puhdistettaisiin liikennepolttoaineeksi (vaihtoehto D), olisivat biokaasuverkon investointikustannukset 7,8 miljoonaa euroa ja käyttökustannukset 1,5 miljoonaa euroa vuodessa, jos tankkausasemien kapasiteetti on 100 Nm³_{biometaania}/h.

Jos biokaasuverkkojen tankkausasemat olisivat kapasiteetiltaan suurempia, 500 Nm³_{biometaania}/h, olisivat biokaasuverkkovaihtoehtojen investointikustannukset noin puolet ja käyttökustannukset noin 60 % verrattuna verkkojen kustannuksiin pienemmillä tankkausasemilla. Koko biokaasuverkon kustannusten kannalta olisi siis edullisempää rakentaa kapasiteetiltaan suurempia tankkausasemia.

Biokaasuverkkovaihtoehtojen kokonaiskustannukset 15 vuoden takaisinmaksuajalla ja 6 % korolla vaihtelevat välillä 2,3 - 21,0 milj. €/a, kun käytetään kapasiteetiltaan 100 Nm³_{biometaania}/h tankkausasemia. Suuremmilla tankkausasemilla kaikkien vaihtoehtojen kokonaiskustannukset lähes puolittuvat. Biokaasuverkkovaihtoehtojen kokonaiskustannukset pienemmillä tankkausasemilla ovat 0,40 - 0,46 €/Nm³_{biometaania} ja suuremmilla tankkausasemilla 0,23 - 0,27 €/Nm³_{biometaania}. Kokonaiskustannukset yhtä kuutiometriä (Nm³) biometaania kohden ovat pienimmät, jos kaikki Keski-Suomessa tuotettava biokaasu puhdistettaisiin 2000 Nm³_{biokaasua}/h käsittelevissä laitoksissa (vaihtoehto B).

Taulukko 27. Keski-Suomen biokaasuverkkovaihtoehtojen A-D (sisältää biokaasun puhdistuksen, siirron ja tankkausasemat) investointi-, käyttö- ja kokonaiskustannukset. Kokonaiskustannuksissa on oletettu investoinneille 15 vuoden takaisinmaksuaika ja 6 % korko.

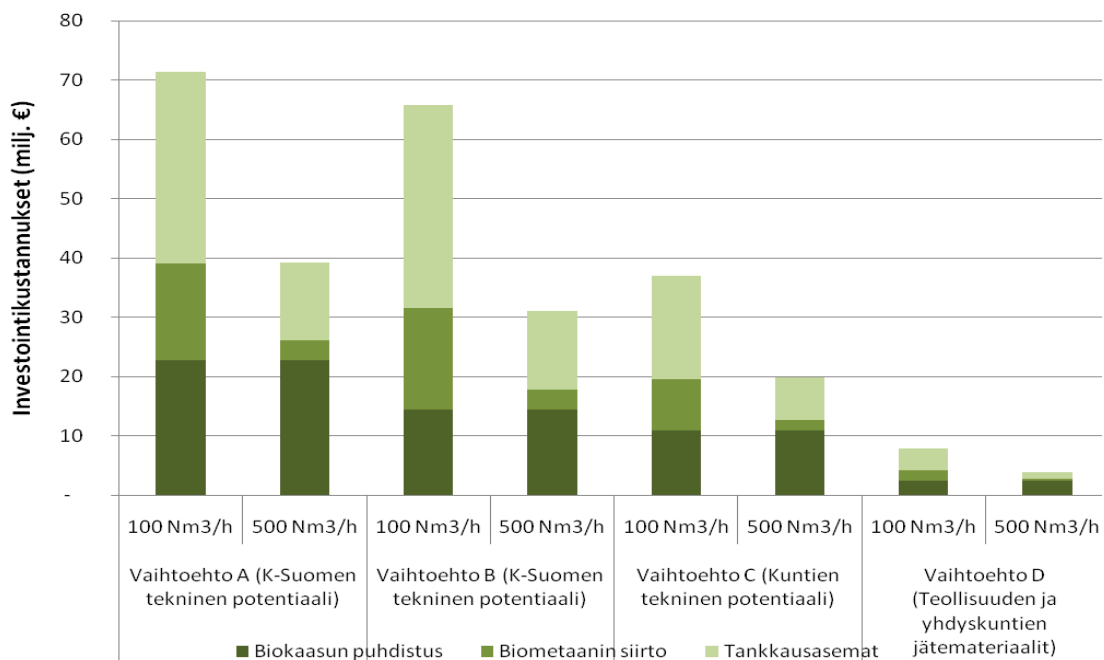
	Tuotetun biometaanin energia	Tankkausasemien kapasiteetti	Biokaasuverkon investointikustan- nukset	Biokaasuverkon käyttökustannukset	Biokaasuverkon kokonais- kustannukset	Biokaasuverkon kokonaiskus- tannukset
	(GWh/a)	(Nm ³ _{biokaasua} /h)	(milj. €)	(milj. €/a)	(milj. €/a)	(€/Nm ³ _{biometaania})
Vaihtoehto A K- Suomen tekninen potentiaali	476	100 500	71,4 39,3	13,6 9,0	21,0 13,0	0,44 0,27
Vaihtoehto B K- Suomen tekninen potentiaali	501*	100 500	65,8 31,0	13,4 8,2	20,1 11,4	0,40 0,23
Vaihtoehto C Kuntien tekninen potentiaali	252	100 500	37,0 19,9	7,0 4,5	10,8 6,6	0,42 0,26
Vaihtoehto D Teollisuuden ja yhdyskuntien jättemateriaalit	50	100 500	7,8 3,9	1,5 0,9	2,3 1,3	0,46 0,26

*Laskennallinen primäärienergia

Jos koko Keski-Suomen biokaasupotentiaali puhdistettaisiin 19:ssä 500 Nm³/h biokaasua käsittelevässä laitoksessa (vaihtoehto A), biokaasun puhdistuslaitoksia on määrällisesti eniten, joten biokaasun puhdistuksen investointikustannuksetkin ovat vaihtoehdoista suurimmat. Jos sama määrä biokaasua puhdistetaan kapasiteetiltaan suuremmissa laitoksissa (vaihtoehto B), on biokaasun puhdistuksen osuus biokaasuverkon investointikustannuksista pienempi (kuva 15).

Tankkausasemien kapasiteetilla on selvä vaikutus biokaasuverkkojen kustannusrakenteeseen. Jos tankkausasemien kapasiteetti olisi 100 Nm³biometaania/h, aiheuttaisivat tankkausasemat biokaasuverkkojen suurimmat investointikustannukset (kuva 15). Jos taas tankkausasemat olisivat kapasiteetiltaan suurempia, 500 Nm³biometaania/h, muodostaisi biokaasun puhdistus suurimman osan biokaasuverkkojen investointikustannuksista kaikilla vaihtoehdoilla.

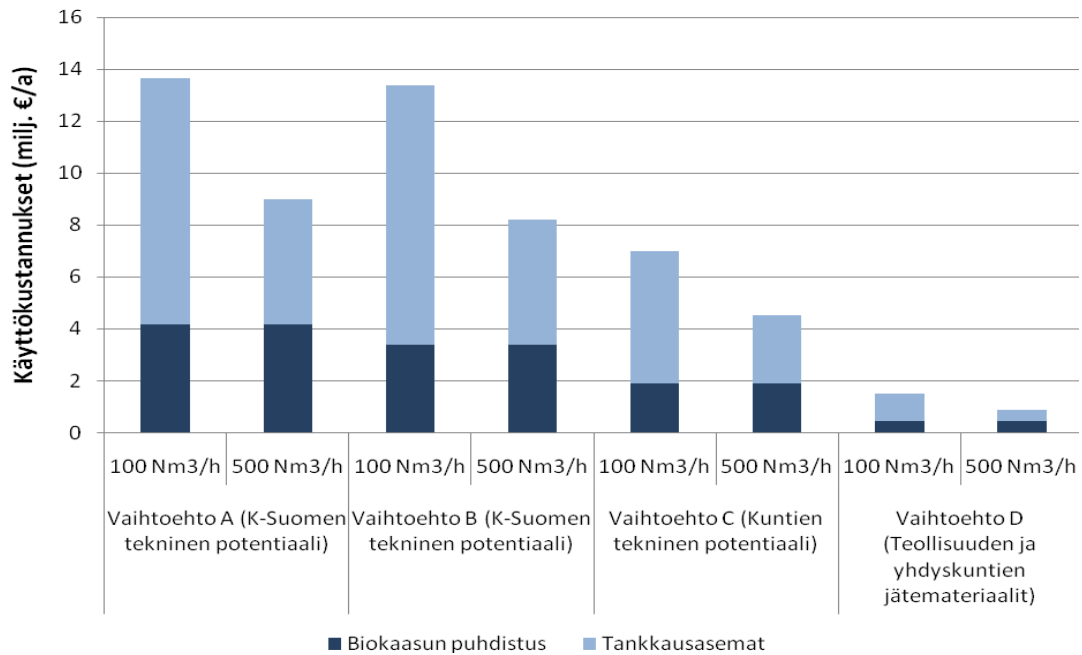
Puhdistuslaitosten ja kaasun tankkausasemien kapasiteetin lisäksi myös siirtoputkiston pituus vaikuttaa biokaasuverkon investointikustannuksiin. Tässä tarkastelussa oletettiin, että jokaista tankkausasemaa kohden rakennetaan 3 km kaasun siirtoputkea. Tästä syystä myös kaasun siirron investointikustannukset olisivat suuremmat jos tankkausasemien kapasiteetti olisi 100 Nm³biometaania/h, kuin jos se olisi 500 Nm³biometaania/h. Jos tankkausasemia on määrällisesti vähemmän, tarvitaan siirtoputkeakin vähemmän. Todellisuudessa tankkausasemien määrän väheneminen ei välttämättä vähentäisi siirtoputkiston pituutta, sillä biokaasun puhdistuslaitosten ja kaasun tankkausasemien välinen etäisyys voisi kasvaa.



Kuva 15. Neljän eri biokaasuverkkovaihtoehdon investointikustannusten rakenne erikokoisilla tankkausasemilla (milj. €).

Myös biokaasuverkkovaihtoehtojen käyttökustannuksissa näkyy tankkausasemien kapasiteetin vaikutus (kuva 16). Jos tankkausasemat ovat kapasiteetiltaan 100 Nm³biometaania/h, muodostavat niiden käyttökustannukset suurimman osan koko biokaasuverkon käyttökustannuksista kaikilla vaihtoehdoilla. Kapasiteetiltaan suuremmilla (500 Nm³biometaania/h) tankkausasemilla biokaasun puhdistuksen ja kaasun tankkausasemien käyttökustannukset ovat lähempänä toisiaan, tosin myös tällöin tankkausasemien

käyttökustannukset ovat suuremmat vaihtoehdoilla A-C. Vaihtoehdolla D biokaasun puhdistuksen ja tankkausasemien käyttökustannukset ovat tällöin yhtä suuret.



Kuva 16. Biokaasuverkko vaihtoehtojen käyttökustannukset erikokoisilla tankkausasemilla (milj. €/vuosi).

5 TULOSTEN TARKASTELU

5.1 Keski-Suomessa tuotettavissa olevan biokaasun määrä

Tämän työn perusteella Keski-Suomessa olisi teknisesti mahdollista tuottaa noin 48 miljoonaa Nm³ biometaania vuodessa (80 miljoonaa Nm³ biokaasua), eli noin 480 GWh/a. Nurmimassan osuus biokaasun tuotantoon käytettävissä olevista raaka-aineista on merkittävä (56 %). Nurmen tilalla voitaisiin käyttää myös jotakin muuta peltoenergiakasvia. Vääntisen (2010) mukaan Keski-Suomen teoreettinen biokaasupotentiaali (0,6-1,5 TWh) olisi huomattavastikin teknistä potentiaalia suurempi. Keski-Suomessa on asetettu tavoitteeksi saavuttaa liikennebiokaasun käytössä 25 GWh:n taso vuoteen 2015 mennessä. Tähän tavoitteeseen päästäisiin jos noin 5 % teknisestä biokaasupotentiaalista käytettäisiin liikennepolttoaineena.

Biokaasun tuotanto on Keski-Suomessa ollut edellä mainittua laskennallista biokaasupotentiaalia huomattavasti vähäisempää. Biokaasua tuotettiin vuonna 2008 yhteensä noin 4,4 miljoonaa Nm³ (noin 26 GWh) (taulukko 28). Jyväskylän Seudun Puhdistamo Oy:llä tuotettiin biokaasua jätevesilietteestä 1,2 milj. Nm³. Mustankorkea Oy:n jätteenkäsittelylaitokselta kerättiin kaatopaikkakaasua 3,1 miljoonaa Nm³, joka käytettiin kaukolämmöntuotannon polttoaineena. Kalmarin tilalla Laukaassa biokaasua tuotettiin eläinten lannasta, elintarviketeollisuuden biojätteistä sekä energiakasveista 0,06 miljoonaa Nm³, josta noin 28 MWh hyödynnettiin liikennepolttoaineena. Keski-Suomen liikennebiokaasun käyttö on siis vuonna 2008 ollut merkittävästi Keski-Suomen liiton vuodelle 2015 asettamaa tavoitetta (25 GWh) alhaisemmalla tasolla (Kuittinen & Huttunen 2009).

Taulukko 28. Keski-Suomen tekninen biokaasupotentiaali verrattuna maakunnassa vuonna 2008 tuotetun biokaasun määrään (Kuittinen & Huttunen 2009).

	Keski-Suomen tekninen biokaasupotentiaali (GWh/a)	Keski-Suomessa tuotettu biokaasu vuonna 2008 (GWh)
Yhteensä	478,6	26,2
Maatalouden materiaalit	405,6	0,4
Teollisuuden ja yhdyskuntien jättemateriaalit	54,4	7,2
Kaatopaikkakaasu	18,6	18,6

Biokaasupotentiaalin arvioimiseen vaikuttavat biokaasun tuotantoon valitut raaka-aineet sekä raaka-aineista tehtävät lähtöoletukset mm. metaanintuottopotentialin suhteen. Kuten Keski-Suomessa, myös EU:n, Irlannin, Saksan ja Ruotsin biokaasupotentiaaleista yli puolet koostuu energiakasveista (taulukko 29). EU:n teknis-taloudellisesta biokaasupotentiaalista 60 % tuotettaisiin energiakasveista. Energiakasvien viljelyyn käytettäisiin 5 % viljelyskelpoisesta maasta (European Biomass Association 2009).

Singh ym. (2010) mukaan biometaanilla voitaisiin käyttää polttoaineena 21 %:ssa Irlannin yksityisautoista vuonna 2020, ja noin 5 % koko liikennesektorin energiantarpeesta voitaisiin täyttää biometaanilla. Irlannin teknis-taloudellisesta biokaasupotentiaalista 79 % tuotettaisiin nurmesta (Singh ym. 2010). Ruotsin biokaasupotentiaalista 51 % tuotettaisiin energiakasveista, joita on oletettu viljeltävän 10 %:lla Ruotsin viljelysmaasta. Vuoteen 2010 mennessä liikennepolttoaineena käytettävän biokaasun osuuden on arvioitu kasvavan 1040 GWh:iin, joka vastaisi noin 7 % Ruotsin biokaasupotentiaalista (Linné ym. 2005).

Taulukko 29. EU:n, Irlannin, Saksan ja Ruotsin biokaasupotentiaalit verrattuna Keski-Suomen biokaasupotentiaaliin ((Linné ym. 2005, European Biomass Association 2009, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. 2009, Singh ym. 2010).

	EU	Irlanti	Saksa	Ruotsi	Keski-Suomi
Teoreettinen biokaasupotentiaali (TWh)	1930	19	108	14	0,6-1,5
Energiakasvien osuus teoreettisesta biokaasupotentiaalista (%)	-	-	57	51	-
Teknis-taloudellinen biokaasupotentiaali (TWh)	460	4,2	-	-	0,5
Energiakasvien osuus teknis- taloudellisesta biokaasupotentiaalista (%)	60	79	-	-	56

- Ei tietoja saatavana

Tieliikenteen polttonesteenkulutus oli Keski-Suomessa vuonna 2008 noin 232 000 tonnia ja energiankulutus 2,8 TWh (VTT 2009a). Jos kulutus pysyisi samana, siitä 17 % voitaisiin korvata biometaanilla, jos kaikki Keski-Suomessa tuotettavissa oleva biokaasu käytettäisiin liikennepolttoainetuotantoon. Tällöin tieliikenteen aiheuttamat hiilidioksidipäästöt vähenisivät myös 17 % (päästökertoimena käytetty moottoribensiinin ja dieselin päästökertoimien keskiarvoa) (Tilastokeskus 2006). Alueellisesti tarkasteltuna EU:n asettamat tavoitteet uusiutuville polttoaineille (10 % osuus bensiinin ja dieselin kokonaiskulutuksesta vuonna 2020) olisi mahdollista saavuttaa Keski-Suomessa

pelkästään biometaanilla. Koko Suomen tieliikenteen polttonesteenkulutus oli vuonna 2008 3,9 miljoonaa tonnia ja energiankulutus 46 TWh (VTT 2009b).

Jos koko Keski-Suomen biokaasupotentiaali hyödynnettäisiin liikennepolttoaineena, tuotetulla biometaanilla voisi ajaa noin 45 000 henkilöautoa tai 1500 kaupunkilinja-autoa vuodessa, olettaen että henkilöautolla ja linja-autolla keskimäärin vuodessa ajettavat kilometrimäärät (16 800 km ja 47 200 km) ja polttoaineenkulutukset pysyisivät samana kuin vuonna 2008 (Tiehallinto 2009). Kaupunkilinja-auton polttoaineenkulutukseksi on oletettu maakaasukäyttöisen, Euro 5 -päästötason kaupunkilinja-auton energiankulutus täytenä (80 matkustajaa) katuajossa (6,7 kWh/km) (VTT 2009c). Vuonna 2008 Suomessa oli yhteensä 3 150 296 ajoneuvoa, joista 86 % oli henkilöautoja (Tiehallinto 2009).

Biokaasun tuotannolla voidaan vähentää maataloudesta ja jätehuollosta aiheutuvia metaanipäästöjä. Kaatopaikat ja lannankäsittely aiheuttivat puolet koko Suomen metaanipäästöistä vuonna 2008 (Tilastokeskus 2010b). Biokaasun puhdistuksesta aiheutuvat metaanihävikit voivat kuitenkin pienentää liikennebiokaasun koko elinkaaren aikaisia positiivisia ympäristövaikutuksia. Saksassa biokaasun puhdistuksen metaanihävikki on rajoitettu 1 %:iin, ja vielä tiukempia rajoituksia (0,5 %) on kaavailtu tulevaisuudessa (Weiland 2009). Keski-Suomen biokaasupotentiaalin puhdistuksesta liikennepolttoaineeksi aiheutuisi vuosittain noin 340 tonnin metaanipäästöt, jos puhdistusprosessin metaanihävikki olisi 1 %. Suomen metaanipäästöt vuonna 2008 olivat yhteensä 203 600 tonnia (Tilastokeskus 2010b). Jos metaanipäästöt pysyisivät ennallaan, lisäksi Keski-Suomen biokaasupotentiaalin puhdistus koko Suomen metaanipäästöjä 0,2 %. Tässä ei kuitenkaan ole otettu huomioon maatalouden ja jätehuollon metaanipäästöjä, joita biokaasun tuotannolla voidaan vähentää. Lisäksi, kuten edellä mainittu, Keski-Suomen biokaasupotentiaalin käyttäminen liikennepolttoaineena vähentäisi maakunnan liikenteestä aiheutuvia hiilidioksidipäästöjä 17 %.

5.2 Keski-Suomen biokaasupotentiaalin puhdistuksen kustannukset

Jos Keski-Suomen biokaasupotentiaali puhdistettaisiin liikennepolttoaineeksi 250 Nm³_{biokaasua}/h käsittelevillä laitoksilla (37 kpl), olisi biokaasun puhdistuksen investointikustannusten keskiarvo eri puhdistusmenetelmillä laitteistovalmistajien ilmoittamien tietojen mukaan noin 37 miljoonaa €. Jos biokaasun puhdistukseen käytettäisiin 500 Nm³_{biokaasua}/h käsitteleviä laitoksia (19 kpl), investointikustannukset olisivat noin 22 milj. €. Investointikustannukset laskisivat edelleen ollen noin 16 milj. € jos puhdistukseen käytettäisiin 1000 Nm³_{biokaasua}/h käsitteleviä laitoksia (9 kpl) ja noin 14 milj. € jos laitosten kapasiteetti olisi 2000 Nm³_{biokaasua}/h (5 kpl).

Kuten investointikustannukset, myös biokaasun puhdistuksen kokonaiskustannukset (sisältää pääoma- ja käyttökustannukset) laskevat kun käytetään kapasiteetiltaan suurempia puhdistuslaitoksia. Keski-Suomen biokaasupotentiaalin puhdistuksen kokonaiskustannukset laskisivat noin 11 milj. €:sta/a 8 milj. €:on/a jos puhdistukseen käytettäisiin 250 Nm³_{biokaasua}/h käsittelevien laitosten sijaan 500 Nm³_{biokaasua}/h käsitteleviä laitoksia. Kapasiteetiltaan 1000 Nm³_{biokaasua}/h käsittelevillä laitoksilla puhdistuksen kokonaiskustannukset olisivat 7 milj. €/a ja 1500 Nm³/h ja 2000 Nm³/h käsittelevillä laitoksilla noin 6 milj. €/a. Jos biokaasua puhdistettaisiin liikennepolttoaineeksi kuntakohtaisesti vain niissä Keski-Suomen kunnissa, joissa biokaasun tuotantopotentiaali ylittää 250 Nm³/h, olisivat Keski-Suomen biokaasun puhdistuslaitosten investointikustannukset noin 15 milj. € ja kokonaiskustannukset noin 5 milj. €/a.

Biokaasun puhdistuksen kustannukset laskevat kaikilla tässä työssä mukana olevilla puhdistusmenetelmillä puhdistuslaitoksen koon kasvaessa. Trendinä biokaasun

puhdistuksessa onkin ollut yhä suuremmat laitokset. Saksassa on maailman suurin yksittäinen biokaasun puhdistuslaitos (Güstrow), jonka kapasiteetti (46 miljoonaa $\text{Nm}^3_{\text{biometaania/a}}$, noin $9000 \text{ Nm}^3_{\text{biokaasua/h}}$) vastaa lähestulkoon koko Keski-Suomen biometaanin tuotantopotentiaalia (Weiland 2009). Ruotsissa suurin osa biokaasun puhdistuslaitoksista on kapasiteetiltaan $200\text{-}600 \text{ Nm}^3_{\text{biokaasua/h}}$ käsitteleviä laitoksia, tosin Ruotsissakin laituskoot ovat olleet kasvamaan päin (Petersson 2009). Ruotsin laituskoot selittyvät osin sillä, että biokaasun puhdistuslaitokset sijaitsevat suurimmaksi osaksi jätevedenpuhdistamoiden yhteydessä joissa biokaasun tuotannon raaka-aineena käytetään puhdistamolietettä. Biokaasun määrä on tällöin usein rajattu puhdistamolta saatavaan lietteen määrään. Saksassa biokaasun tuotantoon käytetään enemmän peltobiomassaa, jolloin raaka-ainetta on saatavilla laajemmin. Tämän työn tulosten perusteella peltobiomassan osuus olisi suuri myös Keski-Suomessa käytettävissä olevista biokaasun tuotannon raaka-aineista. Peterssonin ja Wellingerin (2009) mukaan biokaasun puhdistus kuitenkin kehittyi nopeasti, joten myös kustannusrakenteen kehittyminen saattaa muuttua. Eräs mahdollisuus onkin, että kapasiteetiltaan pienempien puhdistuslaitosten kustannukset saattavat laskea verrattuna suurempiin laitoksiin puhdistusmenetelmien kehittyessä.

Koko Keski-Suomen biokaasupotentiaalin puhdistaminen voidaan toteuttaa esimerkiksi 94:ssä $100 \text{ Nm}^3_{\text{biokaasua/h}}$ käsittelevässä laitoksessa, 19:ssä $500 \text{ Nm}^3_{\text{biokaasua/h}}$ käsittelevässä laitoksessa tai viidessä $2000 \text{ Nm}^3_{\text{biokaasua/h}}$ käsittelevässä laitoksessa. Vuonna 2009 Suomen ainoa biokaasua liikennepolttoaineeksi puhdistava laitos toimi Kalmarin tilalla Laukaalla.

Ruotsissa biokaasun puhdistuslaitosten lukumäärä on kasvanut 2000-luvun alun kymmenestä puhdistuslaitoksesta 38 puhdistuslaitokseen vuonna 2009. Laitoksista 27 käytti puhdistusmenetelmänä vesiabsorptiota, seitsemän paineenvaihteluadsorptiota (PSA) ja neljä kemiallista absorptiota. Ruotsissa biokaasun puhdistaminen liikennepolttoainekäyttöön alkoi vuonna 1992. Vuonna 2008 ajoneuvojen polttoaineena käytettiin yli 30 miljoonaa Nm^3 (300 GWh) biometaania (Petersson 2009).

Myös Saksassa biokaasun puhdistuslaitosten lukumäärä on kasvanut nopeasti vuodesta 2006, jolloin biokaasua alettiin puhdistaa biometaaniksi. Vuonna 2009 Saksassa oli toiminnassa 23 biokaasun puhdistuslaitosta, joiden yhteenlaskettu kapasiteetti oli noin 0,2 miljardia $\text{Nm}^3_{\text{biometaania/a}}$ (noin 2 TWh). Laitoksista 10 käytti puhdistusmenetelmänä paineenvaihteluadsorptiota, viisi vesiabsorptiota, kolme fysikaalista absorptiota (Genosorb) ja viisi kemiallista absorptiota (MEA). Lisäksi 25 laitosta oli rakennus- tai kehitysvaiheessa. Saksassa suurin osa puhdistetusta biokaasusta syötetään maakaasuverkkoon. Yhdistetyn lämmön ja sähkön tuotannon lisäksi maakaasuverkon kaasua käytetään myös liikennepolttoaineena. Saksan hallituksen asettama tavoite on korvata 6 miljardia Nm^3 maakaasua biometaanilla vuoteen 2020 mennessä. Tavoitteen saavuttamiseksi on aikomuksena rakentaa noin 1000 biokaasun puhdistuslaitosta, joiden investointikustannusten on arvioitu olevan yhteensä 10 miljardin euron luokkaa (Weiland 2009).

Tämän työn tulosten perusteella biokaasun puhdistusmenetelmien välillä ei ole suurta eroa kustannuksissa. Biokaasun puhdistusmenetelmien vertailuun teknisten ominaisuuksien ja kustannusten perusteella vaikuttaa alan nopea kehittyminen, minkä vuoksi vertailukelpoista, käyttökokemuksiin perustuvaa tietoa kaikista menetelmistä ei ole. Eniten liiketoiminnallista kokemusta ja kustannustietoa on paineenvaihteluadsorptiosta ja vesiabsorptiosta. Tämän työn ulkopuolelle puhdistusmenetelmistä jäivät membraanisuodataus ja kryotekniikka. Kryotekniikan etuna voidaan pitää alhaisempia kuljetuskustannuksia, koska biometaani on nestemäisessä muodossa. Tällöin biometaania

voidaan kuljettaa pidempiä matkoja alueille, joilla ei ole omaa biokaasun tuotantoa (Bekkering ym. 2009).

Teknologian nopean kehittymisen lisäksi myös muut seikat voivat vaikuttaa biokaasun puhdistuksen kustannusten vertailtavuuteen. Eri puhdistusmenetelmien vertailu kustannusten perusteella on hankalaa, koska jotkut laitteistovalmistajat sisällyttävät kustannuksiin kaikki prosessin vaiheet sisältäen rakennuksen ja rikinpoiston, toiset ilmoittavat pelkän hiilidioksidin poistamisen kustannukset. Jotta eri puhdistusmenetelmien kustannuksia voitaisiin luotettavasti vertailla, pitäisi biokaasun esi- ja jälkikäsitteilyn kustannukset ottaa mukaan, kuten myös jäännösmateriaaleista mahdollisesti koituvat kustannussäästöt (IEA Bioenergy Task 37 2008). Tässä työssä käytetyt kustannustiedot sisältävät rikinpoiston kustannukset niillä menetelmillä, joilla se on tarpeen. Rakennusten kustannuksia ei ole laskettu mukaan.

Biokaasun puhdistusmenetelmien kehittäminen voi myös aiheuttaa sen, että kustannustiedot vanhenevat nopeasti. Perssonin (2003) mukaan ruotsalaisten noin 250 Nm³_{biokaasua}/h käsittelevien biokaasun puhdistuslaitosten investointikustannukset ovat olleet jokseenkin samansuuruisia kuin Urban ym (2008) laitteistovalmistajilta keräämät tiedot. Biokaasun puhdistuksen kokonaiskustannukset eroavat kuitenkin huomattavasti ollen Perssonin (2003) mukaan 200-300 Nm³/h biokaasua puhdistaville laitoksille noin 1-1,5 cent/kWh_{biometaania}, ja Urban ym. (2008) mukaan 250 Nm³/h puhdistaville laitoksille noin 2,23 cent/kWh_{biometaania}. Tässä työssä käytettiin Urban ym. (2008) keräämää, uusinta saatavilla olevaa tietoa biokaasun puhdistusmenetelmien kustannuksista.

Verrattuna biokaasun puhdistukseen, biokaasun tuotannon investointikustannukset ovat suuremmat. Yhdyskuntajätettä ja lietettä käsittelevän, reaktorikooltaan 5000 m³ biokaasulaitoksen investointikustannukset ovat noin 6 milj. € ja käyttökustannukset noin 200 000 €/a (Suvilampi 2010). Laitoksen biokaasun tuotto on noin 170 Nm³_{biokaasua}/h, olettaen, että biokaasun metaanipitoisuus on 60 %. Vastaavasti lantaa ja kasvimassaa käsittelevän, reaktorikooltaan 2000 m³ biokaasulaitoksen investointikustannukset ovat noin 2 milj. € ja käyttökustannukset noin 50 000 €/a (Suvilampi 2010). Tämänkokoinen biokaasulaitos tuottaa noin 100 Nm³_{biokaasua}/h. Keski-Suomen biokaasupotentiaalin tuottamiseen tarvittaisiin noin 55 kappaletta 5000 m³ biokaasulaitosta tai noin 94 kappaletta 2000 m³ biokaasulaitosta, jolloin laitosten investointikustannukset olisivat yhteensä 330 milj. € tai 188 milj. €. Keski-Suomen biokaasupotentiaalin puhdistuksen investointikustannukset ovat 14-37 milj. € riippuen puhdistuslaitosten kapasiteetista, tosin puhdistuksen kustannuksissa ei ole mukana niiden rakennusten kustannuksia, joissa puhdistuslaitteistot sijaitsevat. Biokaasun puhdistuksen kustannukset olisivat siis noin 10 % biokaasun tuotannon kustannuksista.

5.3 Keski-Suomen biokaasuverkon kustannukset ja muita liikennebiokaasun tuotantoon ja käyttöön vaikuttavia tekijöitä

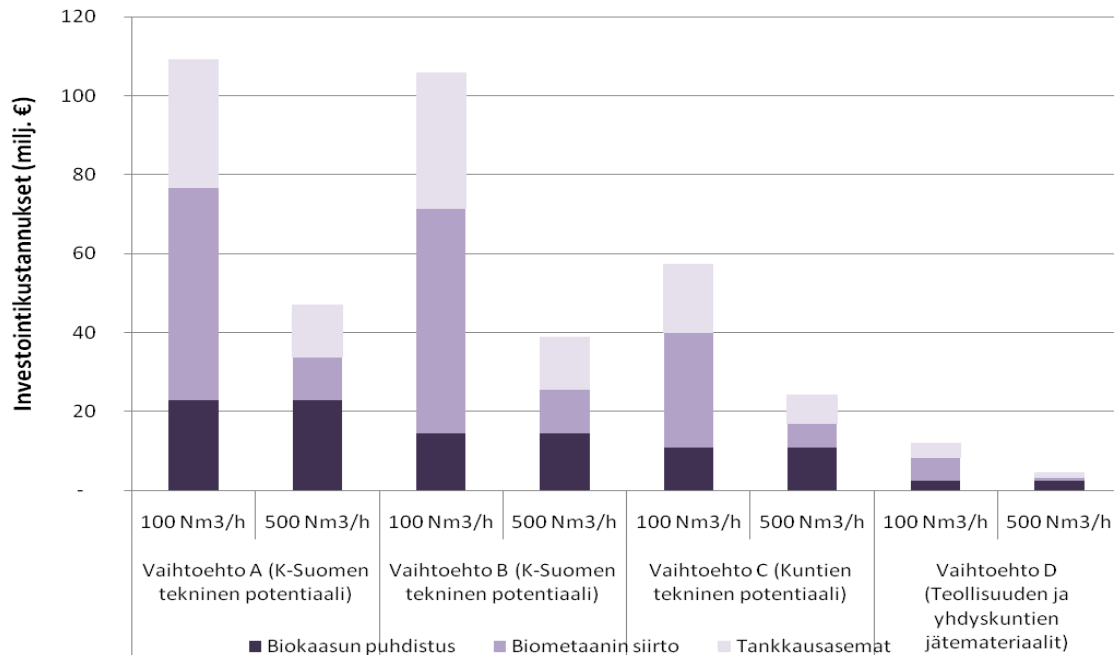
Biokaasuverkkovaihtoehtojen kustannuksiin ja kustannusrakenteeseen vaikuttavat biokaasun puhdistuksesta, siirrosta ja kaasun tankkausasemista tehdyt oletukset. Jos koko Keski-Suomen biokaasupotentiaali puhdistetaan 19:ssä 500 Nm³/h biokaasua käsittelevässä laitoksessa (vaihtoehto A) ovat biokaasuverkon investointikustannukset 39,3 - 71,4 milj. € ja käyttökustannukset 9,0 - 13,6 milj. €/a riippuen tankkausasemien kapasiteetista. Jos biokaasupotentiaalin puhdistamiseen käytetään viittä 2000 Nm³/h biokaasua käsittelevää laitosta (vaihtoehto B), ovat biokaasuverkon investointikustannukset 31,0 - 65,8 milj. € ja käyttökustannukset 8,2 - 13,4 milj. €/a.

Jos biokaasua puhdistetaan liikennepolttoaineeksi ainoastaan niissä keskisuomalaisissa kunnissa, joissa biokaasun tuotantopotentiaali ylittää $500 \text{ Nm}^3/\text{h}$ (vaihtoehto C), laskevat biokaasuverkon investointikustannukset 20,0 - 37,0 milj. €:oon ja käyttökustannukset 4,5 - 7,0 milj. €:oon/a. Kuntakohtaisessa arviossa on oletettu, että jokaisessa kunnassa olisi oma biokaasunpuhdistuslaitos, mutta käytännössä kunnilla voisi olla myös yhteisiä biokaasun puhdistuslaitoksia ja raakabiokaasua voitaisiin kuljettaa yli kuntarajojen. Tällöin voitaisiin rakentaa suurempia puhdistuslaitoksia, jolloin biokaasun puhdistuksen kustannukset pienenisivät.

Tällä hetkellä suurin osa tuotetusta biokaasusta käytetään sekä maailmanlaajuisesti että Suomessa sähkön ja lämmön tuotantoon. Biomassaresurssija tullaan mitä todennäköisimmin myös tulevaisuudessa käyttämään useammassa käyttökohteessa (Åhman 2009). Keski-Suomessa esimerkiksi suurin osa Mustankorkea Oy:n kaatopaikkakaasusta on johdettu Jyväskylän Energian kaukolämpöverkkoon ja käytetty omakotitalojen lämmitykseen (Mustankorkea Oy 2009). Keski-Suomen 25 GWh:n tavoite liikennebiokaasun käytössä voitaisiin kuitenkin saavuttaa kaksinkertaisesti hyödyntämällä liikennebiokaasun tuotannossa pelkästään teollisuuden ja yhdyskuntien orgaaniset jättemateriaalit (vaihtoehto D). Tällöin tuotetun biometaanin kokonaisenergiämäärä olisi 50 GWh/a. Biokaasun puhdistuksen, siirron ja tankkauksen investointikustannukset olisivat tässä työssä käytetyillä oletuksilla 3,9-7,8 milj. € ja käyttökustannukset 0,9-1,5 milj. €/a tankkausasemien kapasiteetista riippuen. Keski-Suomen tavoite toteutuisi myös jos teollisuuden ja yhdyskuntien orgaanisista jättemateriaaleista käytettäisiin biometaanin tuotantoon vain puolet eli rakennettaisiin vain yksi kapasiteetiltaan $500 \text{ Nm}^3/\text{h}$ biokaasua käsittelevä biokaasun puhdistuslaitos, 18 km kaasun siirtoputkea ja kolme $100 \text{ Nm}^3_{\text{biometaania}}/\text{h}$ -kokoista tankkausasemaa.

Kaasun tankkausasemien osalta oletettiin, että jokaisessa biokaasuverkkovaihtoehdossa kaikki tankkausasemat ovat samankokoisia, kapasiteetiltaan joko $100 \text{ Nm}^3_{\text{biometaania}}/\text{h}$ tai $500 \text{ Nm}^3_{\text{biometaania}}/\text{h}$. Tankkausasemien kapasiteetti vaikuttaa biokaasuverkkovaihtoehtojen kustannuksiin siten, että kapasiteetiltaan suurempia asemia käyttämällä saadaan tankkausasemien investointi- ja käyttökustannukset puolittumaan. Jos koko Keski-Suomen biokaasupotentiaali puhdistetaan liikennepolttoaineeksi (vaihtoehdot A ja B) ja käytetään kapasiteetiltaan pienempiä tankkausasemia, tankkausasemien lukumäärä on yli 50. Keski-Suomen alueelle riittäisi kuitenkin ainakin alkuvaiheessa pienempi määrä kaasun tankkausasemia, jolloin tankkausasemien osuus biokaasuverkon investointi- ja käyttökustannuksista pienenesi. Kaasun jakeluun kannattaisi siis käyttää mieluummin suurempikapasiteettisia tankkausasemia. Svensen ym. (2009) ovatkin todenneet, että kaasun tankkausasemien sijainti ja kaasun saantivarmuus on tärkeämpi tekijä kuin tankkausasemien lukumäärä. Tarkkoja kustannustietoja kapasiteetiltaan suuremmista kuin $100 \text{ Nm}^3_{\text{biometaania}}/\text{h}$ kaasun tankkausasemista kuitenkin tarvitaan biokaasuverkkojen kustannusten määrittelyä varten.

Biokaasun siirron osalta oletettiin, että jokaista kaasun tankkausasemaa kohden rakennettaisiin kolme kilometriä kaasun siirtoputkea puhdistetun biokaasun siirtämiseksi biokaasun puhdistuslaitokselta tankkausasemalle. Jos siirtoputkea rakennettaisiinkin 10 km jokaista tankkausasemaa kohden, nousee kaasun siirron osuus suurimmaksi kaikkien biokaasuverkkovaihtoehtojen investointikustannuksista, jos tankkausasemien kapasiteetti on $100 \text{ Nm}^3_{\text{biometaania}}/\text{h}$ (kuva 17). Tällöin biokaasuverkkojen investointikustannukset nousisivat yli 100 milj. euroon, jos maakunnan koko biokaasupotentiaali puhdistettaisiin liikennepolttoaineeksi (vaihtoehdot A ja B). Kaasun siirron kustannukset eivät nouse yhtä voimakkaasti jos käytetään kapasiteetiltaan $500 \text{ Nm}^3_{\text{biometaania}}/\text{h}$ tankkausasemia.



Kuva 17. Biokaasuverkko vaihtoehtojen investointikustannukset (milj. €/vuosi), jos kaasun siirtoputkea rakennetaan 10 km jokaista kaasun tankkausasemaa kohden.

Tässä työssä oletettiin, että puhdistettu biokaasu siirrettäisiin puhdistuslaitoksilta tankkausasemille erillisellä biokaasuputkella. Puhdistetun biokaasun siirtoon on kuitenkin muitakin vaihtoehtoja. Puhdistettu kaasu voidaan esimerkiksi johtaa maakaasuverkkoon tai siirtää esimerkiksi nesteytettynä rekoilla kauempana, esimerkiksi valtateiden läheisyydessä, sijaitseville tankkausasemille. Puhdistetun biokaasun syöttäminen maakaasuverkkoon ei kuitenkaan ole mahdollista Keski-Suomessa, sillä Suomen maakaasuverkko ylittää vain Tampereen korkeudelle.

Liikennebiokaasun tuotannon ja jakelun kokonaiskustannusten kannalta olisi tärkeää tarkastella myös biokaasun tuotantoon käytettävän raaka-aineen ja biokaasulaitoksen kustannuksia osana biokaasuverkkoa. Bekkering ym. (2009) ovat todenneet, että käytännön tietoa biokaasun tuotannosta liikennepolttoaineeksi löytyy runsaasti sekä mikro-tasolla (laitetasolla) että makro-tasolla. Makro-tason tiedolla tarkoitetaan tietoa biomassojen saatavuudesta. Meso-tasolla eli biokaasuverkon toiminnan tasolla on tehty vain hyvin vähän tutkimusta. Usein tutkitaan vain yhtä osaa biokaasuverkosta, esimerkiksi biokaasun tuotannon raaka-aineita, biokaasuprosessia tai biokaasun puhdistusta. Liikennebiokaasun käyttöä suunniteltaessa on kuitenkin tärkeää ymmärtää biokaasuverkon eri osien väliset suhteet, lisää tietoa tarvittaisiin esimerkiksi biokaasulaitosten ja biokaasun puhdistuslaitosten optimaalisesta sijoittelusta biokaasun raaka-aineen saatavuuden mukaan. Myös ajantasainen informaatio biokaasun tuotantoon, puhdistukseen, siirtoon ja jakeluun liittyvistä teknologioista ja niiden kustannuksista on tärkeää koko biokaasuverkon käsittävälle tutkimukselle.

Tässä työssä tarkasteltiin ainoastaan biokaasun puhdistuksen, siirron ja kaasun tankkausasemien kustannuksia. Jos tähän biokaasuverkkoon lisätään biokaasun tuotannon kustannukset, kasvavat koko biokaasuverkon kustannukset huomattavasti. Luvussa 5.2 esitetyksi Keski-Suomen biokaasupotentiaalin tuottamiseen tarvittaisiin noin 55 kappaletta 5000 m³ biokaasulaitosta, joiden investointikustannukset olisivat yhteensä noin 330 milj. € (Suvilampi 2010). Jos kaikki tuotettu biokaasu puhdistettaisiin liikennepolttoaineeksi viidessä 2000 Nm³ biokaasua/h käsittelevässä laitoksessa (vaihtoehto B), kaasun jakeluun

käytettäisiin kapasiteetiltaan 500 Nm³_{biometaania}/h tankkausasemia ja jokaista tankkausasemaa kohden rakennettaisiin 3 km kaasun siirtoputkea, olisivat koko biokaasuverkon investointikustannukset yhteensä noin 360 milj. € ja käyttökustannukset noin 19 milj. €/a. Biokaasun tuotannon investointikustannukset olisivat noin 80-90 % koko biokaasuverkon kustannuksista. Raakabiokaasun siirtoa biokaasun tuotantolaitokselta puhdistuslaitokselle ei ole otettu huomioon. Jos investointia maksettaisiin takaisin 20 vuoden ajan, olisi Keski-Suomen koko biokaasuverkon maksettava osuus sisältäen sekä investointi- että käyttökustannukset noin 37 milj. €/a ilman korkoja.

Biokaasuverkkovaihtoehtojen kokonaiskustannukset kapasiteetiltaan 100 Nm³_{biometaania}/h tankkausasemilla olisivat 0,40 - 0,46 €/Nm³_{biometaania} ja suuremmilla, 500 Nm³_{biometaania}, tankkausasemilla 0,23 - 0,27 €/Nm³_{biometaania}. Tässä työssä biokaasuverkko käsittää biokaasun puhdistuksen, siirron ja jakelun. Jos biokaasu tuotetaan reaktorikooltaan 2000 m³ biokaasulaitoksessa, ovat biokaasun tuotannon kustannukset edellisessä luvussa esitettyjen hintojen mukaan noin 0,30 €/Nm³. Tällöin biokaasun tuotannon, puhdistuksen, siirron ja jakelun kustannukset olisivat noin 0,50 - 0,80 €/Nm³. Bensiinin (95) kuluttajahinta ilman veroja oli Suomessa vuonna 2009 keskimäärin 0,43 €/l ja dieselin 0,45 €/l (Öljy- ja Kaasualan keskusliitto 2010). yksi normaalikuutio (Nm³) biokaasua vastaa noin 1 litraa dieseliä ja 1,1 litraa bensiiniä.

Käytännössä liikennebiokaasun tuotantoon ja käyttöön vaikuttavat kustannusten lisäksi muutkin tekijät. Ruotsissa biokaasun tuotantoa on edistänyt EU:n asettamien uusiutuvien polttoaineiden tavoitteiden lisäksi muun muassa vuonna 2005 voimaan tullut jätelaki, joka kieltää biohajoavan jätteen sijoittamisen kaatopaikoille. Lisäksi useat biokaasuprojektit ovat saaneet investointitukea hallitukselta. Bensiinin ja dieselin verotusta on myös lisätty verrattuna uusiutuviin polttoaineisiin, kun taas liikennebiokaasu on kokonaan vapaa energia- ja hiilidioksidiverosta. Ruotsissa työnantajat, jotka käyttävät kaasuautoja työsuhdeautoina ovat oikeutettuja veroalennukseen. Lisäksi eräät kaupungit ja kunnat ovat tarjonneet kaasuautoille ilmaisen pysäköinnin ja investointitukea kaasuauton hankkimiselle. Tukholmassa kaasuautoit eivät joudu maksamaan ruuhkamaksuja (Lantz ym. 2006, Börjesson & Berglund 2007).

Vaikka liikennebiokaasun käyttöä Ruotsissa ei voikaan suoraan verrata Suomen tilanteeseen, voidaan olettaa että samantapaiset tekijät estävät ja toisaalta myös edistävät liikennebiokaasun käyttöä Suomessa. Suomessa suunnitellaan Ruotsin tapaan biohajoavan jätteen kaatopaikalle sijoittamista kiellettäväksi. Uusi jätelaki voi toimia liikennebiokaasun käyttöä edistäen, tosin biohajoavan jätteen käsittelytapana anaerobisen käsittelyn kanssa kilpailee muun muassa jätteen poltto. Ruotsissa liikennebiokaasun käyttöä haittaavat seikat, kuten rajallinen jakeluinfrastruktuuri ja kaasuautojen korkeampi hinta (Lantz ym. 2006), nousevat todennäköisesti esiin myös Suomessa. Tällöin poliittiset päätökset ja yksittäisten kuntien ja kaupunkien asenteet ja tavoitteet liikennebiokaasun käytön suhteen ovat tärkeässä asemassa tulevaisuutta ajatellen. Ruotsissa kunnat ja kaupungit ovat varsinkin liikennebiokaasun käytön alkuvaiheessa olleet ratkaisevassa roolissa. Kaupungeilla ja kunnilla on esimerkiksi usein tarpeeksi käyttövolyymia jo omissa ajoneuvoissaan. Lisäksi kaupungeilla on mahdollisuus tehdä liikennebiokaasun käyttöä tukevia päätöksiä, kuten tarjota kaasuautoille ilmainen pysäköinti Ruotsin mallin mukaan. Myös Keski-Suomen tapauksessa alueen kunnilla ja kaupungeilla on ratkaiseva rooli liikennebiokaasun käytön yleistymisessä.

Kaiken kaikkiaan poliittiset päätökset ja asetukset ovat todennäköisesti myös Suomessa ratkaisevassa asemassa liikennebiokaasun käytön lisääntymisessä. Biokaasulaitosten ja biokaasun puhdistuslaitosten mahdollisesti saamat tuet voivat

merkittävästi vaikuttaa uusien laitosten perustamiseen. Myös valmisteilla oleva polttoaineverotuksen uudistus voi vaikuttaa liikennebiokaasun kannattavuuteen verrattuna fossiilisiin polttoaineisiin. Polttoaineverouudistuksen tarkoitus on porrastaa polttoaineiden verotus niiden energiasisällön ja hiilidioksidipäästöjen perusteella. Nähtäväksi jää kiristääkö uusi polttoaineverolaki fossiilisten polttoaineiden verotusta, kuten Ruotsissa on tapahtunut, ja miten käy tällä hetkellä polttoaineverosta vapaalle liikennebiokaasulle.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Keski-Suomessa on teknisesti mahdollista tuottaa noin 480 GWh liikennebiokaasua vuodessa. Keski-Suomen tavoitteeseen saavuttaa liikennebiokaasun käytössä 25 GWh:n taso vuoteen 2015 mennessä päästäisiin, jos puolet maakunnassa vuosittain muodostuvista teollisuuden ja yhdyskuntien orgaanisista jätteistä tuotettavasta biokaasusta (50 GWh) puhdistettaisiin liikennepolttoaineeksi. Biokaasun puhdistuksen kustannuksiin vaikuttaa eniten puhdistuslaitoksen koko, mutta myös puhdistusmenetelmä ja laitteistovalmistaja. Biokaasun puhdistuksen kustannukset yhtä kuutiometriä biokaasua kohden ovat edullisimmat suuren kokoluokan puhdistuslaitoksilla. Biokaasun puhdistuksesta, puhdistetun kaasun siirrosta ja tankkausasemien kapasiteetista tehdyt oletukset vaikuttavat koko biokaasuverkon (puhdistus, siirto, tankkausasemat) kustannuksiin. Jos Keski-Suomen biokaasupotentiaali puhdistetaan viidessä 2000 Nm³_{biokaasua}/h käsittelevässä laitoksessa, jokaista kaasun tankkausasemaa kohden rakennetaan 3 km kaasun siirtoputkea ja kaasu jaellaan 11 kpl:ssa kapasiteetiltaan 500 Nm³_{biometaania}/h kaasun tankkausasemilla, ovat biokaasuverkon investointikustannukset 31,0 miljoonaa €, käyttökustannukset 8,2 miljoonaa €/a. Biokaasuverkon kokonaiskustannukset 15 vuoden takaisinmaksuajalla ja 6 % korolla olisivat 11,4 miljoonaa €/a tai 0,23 €/Nm³_{biometaania}. Käytännössä liikennebiokaasun käytön lisääntymiseen vaikuttavat kustannusten lisäksi muutkin seikat, erityisesti poliittiset päätökset esimerkiksi liikennebiokaasun verotuksesta.

KIITOKSET

Haluan kiittää *Biokaasusta energiaa Keski-Suomeen* –hanketta sekä Jyväskylän yliopistoa mahdollisuudesta tehdä tämä työ. Lisäksi haluan kiittää ohjaajiani Jukka Rintalaa ja Saija Rasia. Erityiskiitokset kuuluvat myös Mikalle, Lauralle ja Paulalle tuesta ja kannustuksesta.

KIRJALLISUUS

- Aho, P. 2008: Henkilökohtainen tiedonanto. –Mustankorkea Oy.
- Bekkering, J, Broekhuis, A. A. & van Gemert, W.J.T. 2009: Optimisation of a green gas supply chain – A review. –Bioresource Technology 101: 450 - 456.
- Börjesson, P. & Berglund, M. 2007: Environmental systems analysis of biogas systems-Part II: The environmental impact of replacing various reference systems. –Biomass and Bioenergy 31: 326 - 344.
- Börjesson, P. & Mattiasson, B. 2008: Biogas as a resource efficient vehicle fuel. –Trends in Biotechnology 26: 7 - 13.
- Directive 2003/55/EC: Directive 2003/55/EC of the European Parliament and of the Council concerning common rules for the internal market in natural gas and repealing directive 98/30/EC. 26.6.2003. http://www.energy.eu/directives/1_17620030715en00570078.pdf. [Viitattu 13.10.2009]

- Directive 2009/28/EC: Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing directives 2001/77/EC and 2003/30/EC. 23.4.2009. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0016:0062:EN:PDF>. [Viitattu 13.10.2009]
- Electrigaz Technologies Inc. 2008: Feasibility Study – Biogas upgrading and grid injection in the Fraser Valley, British Columbia. Final Report. 152 s. –Electrigaz Technologies Inc. http://www.lifesciencesbc.ca/files/PDF/feasibility_study_biogas.pdf. [Viitattu 2.11.2009]
- Environment Agency 2004: Guidance on gas treatment technologies for landfill gas engines. 72 s. – Environment Agency.
- EurObserv'ER 2008: Biogas Barometer. Systèmes Solaires 186: 45 - 59. http://www.euroobserver.org/pdf/baro186_a.pdf. [Viitattu 30.9.2008]
- Euroopan yhteisöjen komissio 2006: Komission tiedonanto neuvostolle ja Euroopan parlamentille. Kestävää liikkuvuutta Eurooppaan. Euroopan Komission vuoden 2001 liikennepolitiikan valkoisen kirjan väliarviointi. Bryssel 22.6.2006. KOM(2006) 314 lopullinen. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2006:0314:FIN:FI:PDF>. [Viitattu 29.9.2009]
- Euroopan yhteisöjen komissio 2007: Komission tiedonanto neuvostolle ja Euroopan parlamentille. Biopolttoaineiden kehitystä koskeva kertomus. Kertomus biopolttoaineiden ja muiden uusiutuvien polttoaineiden käytössä Euroopan unionin jäsenvaltioissa saavutetusta edistymisestä. Bryssel 10.1.2007. KOM(2006) 845 lopullinen. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2006:0845:FIN:FI:PDF>. [Viitattu 13.10.2009]
- European Biomass Association 2009: A Biogas Road Map for Europe. 24 s. –European Biomass Association.
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. 2009: Biogas basisdaten Deutschland. 7 s. – Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, Deutschland.
- Ferré, A., Fuchs, G., Zinn, E., Söderqvist, K. & Hirtzberger, P. 2009: Draft demonstration report on fuel stations including deployment strategies and regulatory requirements. 34 s. – Biogasmax. http://www.biogasmax.com/media/biogasmax_fuelstations_2009__083067300_0931_16112009.pdf. [Viitattu 23.11.2009]
- Gasum Oy 2009a: Suomen maakaasuverkosto. http://www.gasum.fi/SiteCollectionImages/Tietoa%20maakaasusta/Kaasuverkostot/2009-10_Suomen_maakaasuverkosto.jpg [Viitattu 6.11.2009]
- Gasum Oy 2009b: Tankkausasemat kartalla. http://www.gasum.fi/liikenne/PublishingImages/kartta_tankkausasemat.pdf. [Viitattu 22.12.2009]
- Gustaffson, M. & Stoor, R. 2008: Biokaasun hyödyntämisen käsikirja –jätteestä energiaksi ja polttoaineeksi. 23 s. –PBI-Research Institute for Project-Based Industry, Åbo Akademin Teollisuustalouden Laboratorio.
- Hagen, M., Polman E., Jensen J., Myken A., Jönsson O. & Dahl A. 2001: Adding gas from biomass to the gas grid. Report SGC 118. 144 s. –Swedish Gas Center. <http://www.sgc.se/dokument/sgc118.pdf>. [Viitattu 12.10.2009]
- Harasimovicz, M., Orluk, P., Zakrzewska-Trznadel, G., & Chmielewski, A. G. 2007: Application of polyimide membranes for biogas purification and enrichment. –Journal of Hazardous Materials 144: 698 - 702.

- IEA Bioenergy Task 37 2008: From biogas to green gas. 6 s. –IEA bioenergy task 37 –Energy from biogas and landfill gas.
- IPCC 2007: IPCC Fourth Assessment Report – Climate Change 2007. Intergovernmental Panel on Climate Change. (<http://www.ipcc.ch/>)
- Jönsson, O. 2004: Biogas upgrading and use as transport fuel. 5 s. –Swedish Gas Centre. http://www.biogasmax.eu/media/biogas_upgrading_and_use_2004__062944200_1011_2404_2007.pdf. [Viitattu 5.10.2009]
- Jönsson, O., Polman, E., Jensen, J.K., Eklund, R., Schyl, H. & Ivarsson S. 2003: Sustainable gas enters the European gas distribution system. 9 s. –Danish Gas Technology Centre. http://www.dgc.eu/publications/pdf/jkj_sustain_gas.pdf. [Viitattu 1.10.2009]
- Keski-Suomen liitto 2009: Keski-Suomen kunnat. <http://www.keskisuomi.fi/fin/etusivu/index.php?id=77>. [Viitattu 26.11.2009]
- Kuittinen, V. & Huttunen M.J. 2009: Suomen biokaasulaitosrekisteri n:o 12. Tiedot vuodelta 2008. 82 s. –Joensuun yliopisto, Ekologian tutkimusinstituutin raportteja N:o 5. Joensuun yliopisto, Ekologian tutkimusinstituutti.
- Kuittinen, V., Huttunen, M. J. & Leinonen, S. 2008: Suomen biokaasulaitosrekisteri n:o 11. Tiedot vuodelta 2007. 82 s. –Joensuun yliopisto, Ekologian tutkimusinstituutin raportteja N:o 4. Joensuun yliopisto, Ekologian tutkimusinstituutti.
- Laki ajoneuvoverolain muuttamisesta 21.12.2007/1311.
- Laki polttoainemaksusta 30.12.2003/1280.
- Lampinen, A. 2008: Liikennebiokaasulainsäädäntö. Palvelututkimus No 8/2008. 215 s. –Vaasan yliopisto, Levón Instituutti.
- Lantz, M., Svensson, M., Björnsson, L. & Börjesson, P. 2006: The prospects for an expansion of biogas systems in Sweden –Incentives, barriers and potentials. –Energy Policy 35: 1830 - 1843.
- Lehtomäki, A., Paavola, T., Luostarinen, S. & Rintala, J. 2007: Biokaasusta energiaa maatalouteen – raaka-aineet, teknologiat ja lopputuotteet. 70 s. –Jyväskylän yliopiston bio- ja ympäristötieteiden laitoksen tiedonantoja 85. Jyväskylän yliopisto, Jyväskylä.
- Linné, M. & Jönsson O. & Rietz, J. 2005: Summary and analysis of the potential for production of renewable methane (biogas and SNG) in Sweden. Literature study. 16 s. –Swedish Gas Centre, BioMil AB. http://www.sgc.se/dokument/biogas_sng_april2005eng.pdf. [Viitattu 13.10.2009]
- Maakaasuyhdistys r.y. 2004: Maakaasukäsikirja 113 s.
- Maakaasuyhdistys r.y. 2007: Suunnitteluohje maa- ja biokaasun tankkausasemille. 24 s.
- Mark, H.M., Othmer, D.M., Overberger, C.G. & Seaborg, G. T. (toim.) 1980: Encyclopedia of Chemical Technology. Third Edition. 23350 s. –John Wiley & Sons, New York, NY.
- Mustankorkea Oy 2009: Kaatopaikkakaasujen hallinta. http://www.mustankorkea.fi/fi/ymparisto/kaatopaikkakaasujen_hallinta/?id=32. [Viitattu 31.3.2010]
- National Society for Clean Air and Environmental Protection (NSCA) 2006: Biogas as a road transport fuel. An assessment of the potential role of biogas as a renewable transport fuel. 52 s.
- Natural Resources Canada 2007: Biogas treatment state-of-the-art review. Ref. No. 047939 (2). 98 s. –Conestoga-Rovers & Associates.

- NGVA Europe (Natural Gas Vehicle Association Europe) 2009: Statistical information on the European and worldwide NGV status. <http://www.ngvaeurope.eu/statistical-information-on-the-european-and-worldwide-ngv-status>. [Viitattu 5.10.2009]
- Nylund, N-O., Sipilä, K., Mäkinen, T., Aakko-Saksa, P., Kujanpää, L. & Laurikko J. 2009: Polttoaineiden laatuporrastuksen kehittäminen –selvitys. Tutkimusraportti VTT-R-4076-09. 150 s. –VTT, Valtion teknillinen tutkimuskeskus.
- Paananen, M. 2007: Bioenergiasta elinvoimaa klusteriohjelma 2007-2015. 37 s. –Jyväskylä Innovation Oy, Jyväskylä. http://www.keskisuomi.fi/filebank/1647-bioenergiasta_elinvoimaa_klusteriohjelma_2007_-_2015.pdf [Viitattu 15.4.2010]
- Pakkanen, M. & Aspholm, N. 2009: Yritysten asenteet ja valmiudet biokaasun käyttöönottoon liikennepolttoaineena. 85 s. –VaasaEMG, Vaasan yliopisto. <http://www.vei.fi/files/pdf/354/BIOMODE220709.pdf>. [Viitattu 6.10.2009]
- Persson, M. 2003: Evaluation of upgrading techniques for biogas. Report SGC 142. 75 s. – Swedish Gas Center.
- Persson, M. 2007: BIOGAS-a renewable fuel for the transport sector for the present and the future. 4 s. Swedish Gas Centre. <http://www.sgc.se/dokument/Biogas%20info%202007.pdf>. [Viitattu 14.10.2009]
- Persson, M. Jönsson, O. & Wellinger A. 2006: Biogas Upgrading to Vehicle Fuel Standards and Grid Injection. 19 s. –IEA bioenergy task 37 –Energy from biogas and landfill gas.
- Persson, M. & Wellinger, A. 2006: Biogas Upgrading and Utilisation. 32 s. –IEA bioenergy task 37 –Energy from biogas and landfill gas.
- Persson, M., Wellinger, A., Rehnlund, B. & Rahm, L. 2007: Report on Technological Applicability of Existing Biogas Upgrading Processes. 43 s. Contract number: 019795. Biogas as vehicle fuel –market expansion to 2020 air quality. –Biogasmax. http://www.biogasmax.eu/media/report_on_technological_2007__041639600_1025_22052007.pdf. [Viitattu 8.10.2009]
- Petersson, A. 2008: Biogas as Transport Fuel –Upgrading Technique and Application. Central European Biomass Conference 2008 18.1.2008, Graz, Austria. http://www.biomasverband.at/static/mediendatenbank/root01/3.%20Veranstaltungen/3.2%20Tagung/Mitteleuropaeische%20Biomassekonferenz%202008/0%20CEBC%202008%20Vortrag/Parallel7_Petersson_Anneli.pdf. [Viitattu 5.10.2009]
- Petersson, A. 2009: Long term experience with biogas upgrading. IEA Task 37 Research Exchange Workshop “Biogas Upgrading” 8.10.2009, Vienna University of Technology, Austria. http://www.iea-biogas.net/Dokumente/vienna09/Petersen_vienna.pdf. [Viitattu 2.11.2009]
- Petersson, A. & Wellinger, A. 2009: Biogas upgrading technologies – developments and innovations. 20 s. –IEA Bioenergy. April 2009.
- Renner 2008: Vehicle production rises, but few cars are “green”. Vital signs –Global trends that shape our future. –Worldwatch Institute. <http://vitalsigns.worldwatch.org/vs-trend/vehicle-production-rises-few-cars-are-%E2%80%9Cgreen%E2%80%9D>. [Viitattu 25.5.2010]
- Rintala, J. 2010: Henkilökohtainen tiedonanto. –Jyväskylän yliopisto.
- Rutledge, B. 2005: California Biogas Industry Assessment White Paper. 38 s. Weststart-CALSTART, Inc. http://www.calstart.org/Libraries/Publications/California_Biogas_Industry_Assessment_White_Paper.sflb.ashx. [Viitattu 7.10.2009]
- Singh, A. Smyth, B. & Murphy, J. D. 2010: A biofuel strategy for Ireland with an emphasis on production of biomethane and minimization of land-take. –Renewable and Sustainable Energy Reviews 14: 277 - 288.

- Suvilampi, J. 2010: Henkilökohtainen tiedonanto. –Watrec Oy.
- Svensen, B., Rydehell, M., Hirtzberger, P. 2009: Market opportunities for introduction of large scale biogas for vehicle use, based on regional fleet assessments, resource potentials and upgrading possibilities. 43 s. –Biogasmax.
http://www.biogasmax.eu/media/r7_market_opportunities_for_biogas__059544700_1411_21072009.pdf. [Viitattu 2.11.2009]
- Tiehallinto 2009: Tietilasto 2008. Tiehallinnon tilastoja 1/2009. 82 s. –Edita Prima Oy, Helsinki.
- Tilastokeskus 2006: Polttoaineluokitus 2006. 3.4.2006.
http://www.stat.fi/tup/khkinv/khkaasut_polttoaineluokitus.xls [Viitattu 21.6.2010]
- Tilastokeskus 2010a: Maakuntien pinta-ala, väestö ja bruttokansantuote.
http://www.stat.fi/tup/suoluk/suoluk_vaesto.html#bruttokansantuote. [Viitattu 20.5.2010]
- Tilastokeskus 2010b: Metaanipäästöt Suomessa 1990, 1995-2008.
http://www.stat.fi/til/khki/2008/khki_2008_2010-04-23_tau_003_fi.html. [Viitattu 21.5.2010]
- Torri, P. 2009: Henkilökohtainen tiedonanto. –Gasum Oy.
- Trendsetter 2003: Biogas as vehicle fuel. A European Overview. Trendsetter Report No 2003:3, 51 s. <http://213.131.156.10/xpo/bilagor/20040115134708.pdf>. [Viitattu 5.10.2009]
- Urban, W., Girod, K., Lohmann, H., 2008: Technologien und Kosten der Biogasaufbereitung und Einspeisung in das Erdgasnetz. Ergebnisse der Markterhebung 2007–2008. 123 s. Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik, Oberhausen.
- Vainikka, J. 2009: Maa- ja biokaasun liikennekäyttö. Kaasuautoilun infopäivä 5.11.2009, Autotalo Laakkonen, Tampere.
- Volkswagen 2010: Passat Variant. <http://www.volkswagen.fi/VV-Auto/VW4.nsf/0/831AA80ECC99866AC22575700041FEE8?OpenDocument>. [Viitattu 21.5.2010]
- VTT 2009a: Läänien ja kuntien tieliikenteen pakokaasupäästöt vuosina 2001-2008.
<http://lipasto.vtt.fi/liisa/kunnat2.htm>. [Viitattu 25.3.2010]
- VTT 2009b: Suomen tieliikenteen päästöt ja energiankulutus.
<http://lipasto.vtt.fi/liisa/paastodata.htm>. [Viitattu 6.5.2010]
- VTT 2009c: Liikennevälineiden yksikköpäästöt. Maakaasukäyttöinen kaupunkilinja-auto.
http://lipasto.vtt.fi/yksikkopaastot/henkiloliikenne/tieliikenne/linja-autot/bussikatu_kaasu.htm. [Viitattu 2.6.2010]
- Vänttinen, V-H. 2009: Biokaasuteknologian alueellinen hyödyntämispotentiaali – esimerkkitapauksena Keski-Suomen maakunta. 71 s. Pro gradu -tutkielma, Jyväskylän yliopisto, Jyväskylä.
- Weiland, P. 2009: Status of biogas upgrading in Germany. IEA Task 37 Research Exchange Workshop “Biogas Upgrading” 8.10.2009, Vienna University of Technology, Austria.
http://www.ifa-tulln.ac.at/fileadmin/codi/uploads/Upgrading_Biogas/05_Weiland_Biogas_in_Germany.pdf. [Viitattu 3.6.2010]
- Åhman, M. 2009: Biomethane in the transport sector—An appraisal of the forgotten option. – Energy Policy (2009, in press).
- Öljy- ja Kaasualan keskusliitto 2010: Öljytuotteiden kuluttajahintaseuranta. http://www.oil-gas.fi/files/728_Kuluttajahintaseuranta.pdf. [Viitattu 22.7.2010]