

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Liiketoiminnan logistiikan koulutusohjelma / Hankintalogistiikka

Essi Kuningas – Satu Kärki

BIOKAASUN KULJETUS MAAKAASUVERKOSTOON: KAASUMAISEN
BIOKAASUN PUTKISIIRRON JA NESTEYTETYN BIOKAASUN
AUTOKULJETUKSEN VERTAILU

Opinnäytetyö 2011

TIIVISTELMÄ

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Liiketoiminnan logistiikan koulutusohjelma

KUNINGAS ESSI & KÄRKI SATU	Biokaasun kuljetus maakaasuverkostoon: kaasumaisen biokaasun putkisiirron ja nesteytetyn biokaasun autokuljetuksen vertailu
Opinnäytetyö	72 sivua + 9 liitesivua
Toimeksiantaja	Gasum Oy
Maaliskuu 2011	
Avainsanat	biokaasu, nesteytetty biokaasu (LBG), kestävä kehitys, hiilijalanjälki, energiatehokkuus, ilmastonmuutos, putkikuljetus, maantiekuljetus

Tämä opinnäytetyö suoritettiin toimeksiantona Gasum Oy:lle. Työn tarkoituksena oli tarkastella ja vertailla biokaasun kahta mahdollista kuljetusvaihtoehtoa jalostuslaitokselta maakaasun siirtoverkkoon. Työssä käytettiin lähtötietoina Nastolaan suunnitteilla olevan biokaasun jalostuslaitoksen alustavia kustannusarvioita ja suunnitteluun liittyviä muita tietoja. Gasum Oy halusi selvityksen siitä, kumpi siirtomenetelmä on taloudellisesti ja ekologisesti edullisempi, kun muuttujana on kuljetettavan matkan pituus.

Jalostettu biokaasu voidaan siirtää jakelua varten maakaasuverkkoon joko kaasumaisena kiinteää putkea pitkin tai kuljettaa autokuljetuksena keskitetyn syötön pisteeseen nestemäisessä muodossa. Työssä selvitettiin näiden kahden siirtomenetelmän ympäristövaikutuksia ja kustannuksia. Kummallekin menetelmälle laskettiin prosessista syntyvä kokonaishiilijalanjälki, kokonaiskustannukset ja kokonaisenergiankulutus, minkä jälkeen tuloksia voitiin tarkastella graafisen esityksen avulla syöttämällä muuttujan eri arvoja laskentataulukkoon.

Työn tuloksena saatiin selville kilometrimääräiset leikkauspisteet, jolloin toinen kuljetusmenetelmä muuttuu toista edullisemmaksi kustannusten, hiilijalanjäljen ja energiatehokkuuden osalta. Vastaukseksi tutkimuskysymykseen saatiin, että putkisiirto on parempi siirtomuoto aina noin 25...30 kilometrin etäisyydelle saakka. Paremmuutta rajaa ainoastaan kustannustehokkuus, sillä kahdella muulla kriteerillä, ympäristövaikutusten ja energiatehokkuuden suhteen, putkisiirto on tarkasteluetäisyyden koko matkalla parempi vaihtoehto.

ABSTRACT

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

University of Applied Sciences

Business Logistics

KUNINGAS ESSI & KÄRKI SATU Transport of Biogas to the Natural Gas Network: Costs and Environmental Effects

Bachelor's Thesis 72 pages + 9 pages of appendices

Commissioned by Gasum Oy

March 2011

Keywords biogas, liquefied biogas (LBG), sustainable development, carbon footprint, energy efficiency, climate change, pipeline transfer, road transport

This Bachelor's Thesis was commissioned by Gasum. The purpose of this study was to compare the costs and environmental effects of transporting biogas from the processing plant to the natural gas network. The two modes of transport that were examined in this case were road transport and pipeline transfer. The initial data utilised in the calculations were based on the Nastola project, where Gasum and Biovakka are establishing the first biogas production plant in Finland to be located on the natural gas network area. Gasum's interest was to use the information provided by this study as a guideline for which transport mode is economically and ecologically the most affordable option when the variable is distance.

Processed biogas can be transferred to the natural gas distribution network either inside a pipeline or by road in a tank truck. Transportation by road to the centralized injection point requires that the gas is liquefied. In this study the environmental effects and total costs of these two transport modes were clarified. Total carbon footprint, total costs and total energy consumption of the processes were calculated for both options and different values for the variable were fed in the chart, which enabled the observation of the results from a graphic illustration.

As a result of this research were intersections that show the distance in kilometers when the other transport mode changes more affordable than the other by its costs, carbon footprint and energy efficiency. The answer to the research question was that pipeline transfer is a better option until 25. . .30 kilometres. Superiority was solely determined by cost efficiency, because by the other two criterions, environmental impacts and energy efficiency, pipeline transfer is a better option within the whole range.

ALKUSANAT

Haluamme kiittää Gasum Oy:tä mielenkiintoisen aiheen toimeksiannosta. Työ on tarjonnut sopivasti haasteita, ja olemme saaneet oppia paljon uutta myös oman osaamisalamme ulkopuolelta.

Erinomaisesta ohjauksesta ja tuesta koko projektin aikana kiitämme erityisesti Gasum Oy:n kehitysinsinööri Anni Nuppusta, siirtopalveluiden johtaja Ari Suomilammia, teknologiapäällikkö Sari Siitosta sekä projektipäällikkö Esa Hallivuorta.

Tämän työn toteuttaminen olisi ollut mahdotonta ilman läheistemme tukea ja kärsivällisyyttä. Matkan varrelle on mahtunut ylä- ja alamäkiä, joista olemme kuitenkin selvinneet toisiamme tukien.

Kotkassa 14.2.2011

Essi Kuningas

Satu Kärki

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT	4
1 JOHDANTO JA TUTKIMUSKYSYMYKSET	8
1.1 Johdanto	8
1.2 Tutkimuskysymys	9
1.3 Toimeksiantajan esittely	10
2 KULJETUKSET	11
2.1 Kuljetusten tehokkuus	12
2.1.1 Maantiekuljetusten tehokkuus	12
2.1.2 Putkikuljetusten tehokkuus	13
2.2 Kuljetuskustannukset	14
2.2.1 Maantiekuljetusten kustannukset	15
2.2.2 Putkikuljetusten kustannukset	15
2.3 Kuljetusten ympäristövaikutukset	15
2.3.1 Maantiekuljetusten ympäristövaikutukset	16
2.3.2 Putkikuljetusten ympäristövaikutukset	18
2.3.2.1 Rakentamisen aikaiset vaikutukset	19
2.3.2.2 Käytön aikaiset vaikutukset	20
2.3.2.3 Pysyvät vaikutukset ympäristöön	21
3 KESTÄVÄ KEHITYS	21
3.1 Energiapolitiikka	24
3.2 Energiatehokkuus	26
3.3 Hiilijalanjälki	27
4 MAAKAASU JA BIOKAASU	28
4.1 Kaasun käyttö Suomessa	30
4.2 Hinnoittelu	30
4.3 Turvallisuus	31

5	MAAKAASUN JA BIOKAASUN KULJETUSMUODOT	31
5.1	Maantiekuljetukset	32
5.2	Rautatiekuljetukset	33
5.3	Vesitiekuljetukset	33
5.4	Putkikuljetukset	33
5.5	Case-tarkastelu: Biokaasun kuljetus maakaasuverkostoon	34
5.5.1	Jalostetun biokaasun suora putkisiirto maakaasun siirtoverkkoon	37
5.5.2	Nesteytetyn biokaasun keskitetty syöttö maakaasuverkostoon	38
6	BIOKAASUN KULJETUSVAIHTOEHTOJEN KUSTANNUKSET, ENERGIATEHOKKUUS JA HIILIJALANJÄLKI	39
6.1	Biokaasun kuljetusvaihtoehtojen kustannusten, energiatehokkuuden ja hiilijalanjäljen laskeminen	40
6.1.1	Putkisiirron ominaiskustannus	42
6.1.2	Johtopäätöksiä putkisiirron kustannuslaskennasta	44
6.1.3	Nesteytetyn siirron ominaiskustannus	45
6.1.4	Johtopäätöksiä nesteytetyn siirron kustannuslaskennasta	48
6.1.5	Putkisiirron hiilijalanjälki	49
6.1.6	Johtopäätöksiä putkisiirron hiilijalanjäkilaskennasta	50
6.1.7	Nesteytetyn siirron hiilijalanjälki	50
6.1.8	Johtopäätöksiä nesteytetyn siirron hiilijalanjäkilaskennasta	53
6.1.9	Putkisiirron energiankulutus	53
6.1.10	Nesteytetyn siirron energiankulutus	54
6.2	Kustannukset	57
6.3	Hiilijalanjälki	60
6.4	Energiatehokkuus	63
7	JOHTOPÄÄTÖKSET	65
LIITTEET		
	Liite 1 Putkisiirto - hiilijalanjälki	
	Liite 2 Nesteytetty siirto	
	Liite 3 Putkisiirto kustannukset	
	Liite 4 Nesteytetyn siirron kustannukset	

Liite 5 Nesteytetyn biokaasun kuljetuskustannus

Liite 6 Energiankulutusvertailu

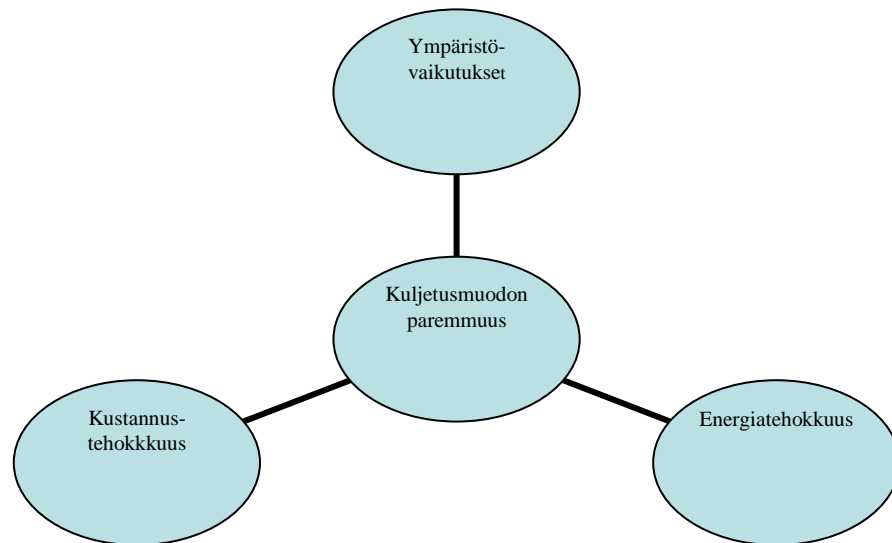
1 JOHDANTO JA TUTKIMUSKYSYMYS

Tämä opinnäytetyö on suoritettu toimeksiantona Gasum Oy:lle. Työstä tehtiin kaksi eri versiota, joista julkinen versio ei sisällä toimeksiantajan luottamukselliseksi määrittelemiä tietoja. Aihe on ajankohtainen, sillä Gasum on yhteistyössä biokaasuteknologiaan erikoistuneen Biovakka Suomi Oy:n kanssa aloittanut Nastolaan rakennettavan biokaasulaitoksen suunnittelun. Tuotanto on tarkoitus käynnistää vuosien 2011–2012 aikana. Gasumin ja Biovakan on tarkoitus rakennuttaa maakaasuverkon läheisyyteen useita biokaasulaitoksia, joista Nastolan laitos on ensimmäinen.

1.1 Johdanto

Tässä työssä tarkastellaan ja vertaillaan biokaasun kahta mahdollista kuljetusvaihtoehtoa jalostuslaitokselta maakaasun siirtoverkkoon. Jalostettu biokaasu voidaan siirtää jakelua varten maakaasuverkkoon joko kaasumaisena kiinteää putkea pitkin tai kuljettaa autokuljetuksena keskitetyn syötön pisteeseen nestemäisessä muodossa. Työssä selvitetään näiden kahden siirtomenetelmän ympäristövaikutuksia, energiatehokkuutta sekä niiden kustannuksia, joiden lähtötietoina ovat Nastolan laitoksen suunnittelutyön yhteydessä hankitut kustannusarviot. Työn lopuksi tarkastellaan, kumpi biokaasun siirtomenetelmistä on parempi, kun muuttuva tekijä on kuljetettavan matkan pituus.

Toimeksiantaja määrittelee edellä mainitut kolme tekijää eli ympäristövaikutukset, energiatehokkuuden ja kokonaiskustannukset paremmuuden kriteereiksi. Nämä kolme tekijää eivät välttämättä ole toisiaan poissulkevia tai toisiaan tukevia, vaan voivat antaa ristiriitaisiakin tuloksia. Tätä kolmen tekijän keskinäistä epäsuhtaa voidaan kuvata alla olevassa kuvassa (kuva 1) esitettynä triangulaationa.



Kuva 1 Eri tekijöiden vaikutus kuljetusmuodon paremmuuteen

1.2 Tutkimuskysymys

Tässä tutkimuksessa päätutkimuskysymys on: kumpi kuljetusmuoto, putkisiirto vai nesteytetty siirto, on parempi biokaasun siirrossa maakaasuverkostoon? Varsinainen tutkimuskysymys voidaan purkaa lisäksi kolmeen alakysymykseen:

- Kumpi kuljetusmuoto on kustannuksiltaan edullisempi?
- Kumpi kuljetusmuodoista on ympäristövaikutuksiltaan pienempi?
- Kumpi kuljetusmuoto on energiatehokkuudeltaan parempi?

Koska kaikki paremmuuden kolme kriteeriä todennäköisesti muuttuvat kuljetusetäisyyden funktiona, tehdään tarkastelu nimenomaan tarkastelemalla eri kriteerejä kuljetusmatkan muuttuessa. Toimeksiantaja rajasi työn koskemaan maksimissaan noin joidenkin kymmenien kilometrien matkaa, koska pidemmän siirtoputken rakentaminen ei ole liiketaloudellisesti kannattavaa. Tässä työssä

tehdyissä tarkasteluissa on käytetty joko 150 km:n tai 200 km:n matkaa vertailukaavioiden luettavuuden parantamiseksi.

Tutkimuksen teoriaosassa tarkastellaan, kuinka ympäristövaikutuksia voitaisiin parhaiten verrata kahden eri kuljetusvaihtoehdon kesken. Energiatehokkuuden vertailupohjana voidaan suoraan käyttää käytettyä energiamäärää siirrettävää biokaasuyksikköä kohden, samoin kuin kustannusvertailussa käytetään euromäärää siirrettyä biokaasuyksikköä kohden. Teoriaosuudessa tarkastellaan kestävän kehityksen kautta energiatehokkuuden merkitystä yleensä ja pyritään avaamaan, miksi energiatehokkuus on valittu yhdeksi paremmuuden kriteereistä. Lisäksi teoriaosuudessa pyritään kestävän kehityksen viitekehityksen kautta avaamaan, miten ympäristövaikutuksia voidaan vertailla eri kuljetusvaihtoehtojen kesken. Teoriaosuudessa ei varsinaisesti tarkastella kustannustehokkuutta, vaan alempia kustannuksia voidaan pitää implisiittisesti tavoiteltavina.

Kestävä kehitys, ilmastonmuutos, energiatehokkuus, hiilijalanjälki ja biopolttoaineet sekä uusiutuva energia ovat tänä päivänä vilkkaan yhteiskunnallisen keskustelun pääteemoja. Ympäristön monimuotoisuuden säilyttämiseksi ja ilmaston lämpenemisen ehkäisemiseksi on solmittu sopimuksia ja laadittu direktiivejä ja ohjeistuksia niin paikallisella, alueellisella kuin globaalilla tasolla. Myös yritykset kiinnittävät entistä enemmän huomiota siihen, että toiminta on paitsi taloudellisesti, myös ekologisesti kannattavaa ja kestävän kehityksen periaatteiden mukaista. Tämän opinnäytetyön tarkoitus on toimia toimeksiantajalle tulevia biokaasulaitoshankkeita ajatellen suuntaa antavana ohjeistuksena kokonaisvaltaisesti edullisinta biokaasun siirtomenetelmää valittaessa.

1.3 Toimeksiantajan esittely

Gasum Oy on vuonna 1994 perustettu maakaasuyhtiö, jonka omistavat energiayhtiö Fortum (omistusosuus 31 %), OAO Gazprom (25 %), Suomen valtio (24 %) ja E. ON Ruhrgas (20 %) (Gasum Oy 27.7.2010).

Gasum-konserni koostuu emoyhtiö Gasum Oy:stä, Gasum Paikallisjakelu Oy:stä, Gasum Energiapalveluista, Kaasupörssi Oy:stä sekä tytäryhtiö Gaasienergia As:sta. Emoyhtiö Gasum Oy huolehtii maakaasun riittävästä saatavuudesta hankkimalla sitä venäläiseltä Gazpromilta. Lisäksi emoyhtiö toimii tukkumyyjänä suurasiakkaille ja

huolehtii maakaasun siirrosta asiakkaille huolehtimalla siirtoverkoston laitteiden, putkien, valvontalaitteiden sekä kompressorien kunnosta sekä siirtokapasiteetin vastaavuudesta. Gasum Paikallisjakelu Oy välittää maakaasua pienille ja keskisuurille yrityksille ja kotitalouksille sekä lisäksi kehittää maakaasun liikennekäyttöä. Jakelualueita on Helsingissä, Porvoossa, Siuntiossa, Kotkassa ja Lohjalla. Gasum Energiapalvelut Oy tarjoaa palveluita ja laitteita maakaasun käyttöön sekä lämmitysratkaisuja omakotitaloille ja asuinalueille. Myös jakeluverkostojen suunnittelu ja rakentaminen kuuluvat Gasum Energiapalveluille. Gaasienergia As on Gasumin tytäryhtiö, jolla on maakaasun jakelutoimintaa Tallinnassa. (Konsernirakenne 25.8.2010.)

Gasumilla on käytössä ISO 14001 -standardiin perustuva ympäristöjärjestelmä (Energiaa ympäristöä kunnioittaen 1.9.2010). ISO 14001 on ympäri maailman laajalti käytössä oleva ympäristöjärjestelmämalli, joka auttaa organisaatioita parantamaan ympäristönsuojelunsa tasoa sekä raportoimaan sidosryhmille ympäristöasioiden huomioinnista yrityksen toiminnassa (Ympäristöjärjestelmä 2.9.2010). Gasumin toimintajärjestelmä on sertifioitu ja noudattaa ISO 9001:2000, ISO 14001:2004 ja OHSAS 18001:2007 -standardeja. Laatu- ja ympäristöjärjestelmän lisäksi Gasum on liittänyt toimintajärjestelmäänsä myös turvallisuusjohtamisjärjestelmän, joka sertifioitiin toimintajärjestelmään osaksi vuonna 2009. Turvallisuusjohtamisjärjestelmä perustuu OHSAS 18001:2007 työterveys- ja työturvallisuusjohtamisjärjestelmästandardiin. (Gasum vuosikertomus 2009: 27.)

2 KULJETUKSET

Kuljetusmuodolla tarkoitetaan kuljetukseen käytettävää kuljetusvälinettä tai elementtiä. Kuljetusmuotoja ovat maantie-, rautatie-, vesitie-, lento- ja putkikuljetukset. Maantiekuljetuksia suoritetaan autolla tai traktorilla, rautatiekuljetuksia junalla ja ilmatiekuljetuksia lentokoneella. Vesitiekuljetukset käsittävät uiton, sisävesiliikenteen (joet ja järvet), rannikko- sekä meriliikenteen. Yhdistetyillä eli intermodaalikuljetuksilla tarkoitetaan kuljetusta, jossa tavaran saattamiseksi määränpäähän käytetään useampaa eri kuljetusmuotoa. Putkikuljetuksella tarkoitetaan putken tai johdon sisällä suoritettavia kuljetuksia, kuten nesteiden, sähkön tai kaasujen siirtoa. (Hokkanen et al. 2004: 102.) Suomen

Tilastokeskus laskee putkikuljetuksiksi ainoastaan maakaasuputkiston (Hokkanen et al. 2004: 132).

2.1 Kuljetusten tehokkuus

Kiinnittämällä huomiota kuljetusten tehokkuuteen, kaluston kunnossapitoon ja maantiekuljetuksissa taloudelliseen ajotapaan voidaan minimoida kuljetuksista aiheutuva ympäristökuormitus. Mitä vähemmän kuljetuksiin käytetään energiaa, sitä vähemmän aiheutetaan myös ympäristöhaittoja. (Karhunen et al. 2008: 119.)

Kuljetustoiminnan on kuitenkin oltava tehokasta myös taloudellisessa mielessä, mikä puolestaan luo edellytykset muulle toiminnalle. Taloudellisuus on kuljetusyrityksen toiminnan keskeisin tavoite, joka vaikuttaa kannattavuuteen, hinnoitteluun, kilpailukykyyn, palvelutasoon, kuljetusvarmuuteen ja niin edelleen. (Oksanen 2004: 29.)

Tässä työssä tarkastellaan lähemmin tehokkuutta maantie- ja putkikuljetusten kohdalla, koska ne ovat työn empiirisen tutkimusosion kannalta keskeiset kuljetusmuodot.

2.1.1 Maantiekuljetusten tehokkuus

Maantiekuljetukset ovat Suomen merkittävin kuljetusmuoto. Suomessa yleisten teiden tieverkko on yhteensä noin 78 000 kilometriä pitkä, kattaen lähes koko maan.

Kuljettaminen maanteitse on nopeaa ja joustavaa juuri kattavan liikenneinfrastruktuurin ansiosta. Maantiekuljetus on monesti myös edullinen vaihtoehto kaluston sitoman suhteellisen pienen pääoman vuoksi, joskin suoritevolyymien kasvaminen vaikuttaa edullisuuteen negatiivisesti. Myös joustavuus ja nopeus kärsivät matkan, tavaramäärän tai molempien yhtä aikaa lisääntyessä. (Hokkanen et al. 2004: 107,111.)

Ympäristöhaittojen pienentäminen ja tehokkaaseen energiankäyttöön liittyvät taloudelliset näkökohdat ovat saaneet kuljetusyritykset kiinnittämään entistä enemmän huomiota ajoneuvokaluston käyttöön ja kunnossapitoon. Tutkimusten mukaan taloudellinen ajotapa ja energiansäästö muun muassa:

- vähentävät polttoaineenkulutusta 8–12 %, eli yhden auton kohdalla on vuosittain mahdollisuus säästää tuhansia euroja
- vähentävät jarrujen, renkaiden ja muiden osien kulumista ja huoltotarvetta, lisää ajoneuvojen käyttöikä ja jälleenmyyntiarvoa
- vähentävät kuljettajan stressiä
- täyttävät asiakkaiden laatu- ja ympäristövaatimukset ja parantaa yrityksen imagoa. (Karhunen et al. 2008: 119.)

Energian tarve ja käyttö

Ajoneuvo tarvitsee liikkumiseen energiaa. Tarvittavan energian määrä riippuu monista ajoneuvoon ja liikenneympäristöön liittyvistä tekijöistä. (Karhunen et al. 2008: 119.)

Ajoneuvon kuluttaman energian määrään voidaan vaikuttaa esimerkiksi kaluston valinnalla, huollolla ja oikeanlaisella kuormaamisella, taloudellisella ajotavalla, kuljetusten kokonaissuunnittelulla ja reittioptimoinnilla. Kaluston valinnassa on huomioitava muun muassa ajoneuvon koko ja tyyppi, jotka tulee sovittaa kuljetettavan tuotteen määrään, tilavuuden ja ominaisuuksien mukaan, jotta hyötykuorma olisi mahdollisimman suuri. (Karhunen et al. 2008: 120,121.) Mitä suurempi kuorma on, sitä pienemmät ovat yksikkökustannukset (Oksanen 2004: 74).

Ajoneuvon energiankulutukseen, ja näin ollen kuljetuksen aiheuttamaan hiilijalanjälkeen, vaikuttavat muun muassa seuraavat taloudelliseen ajotapaan liittyvät tekijät: auton kunnan ja rengaspaineiden tarkastus, joutokäynnin sekä jarrutusten ja kiihdytysten välttäminen, taloudellinen vaihteiden vaihtaminen, liikenneympäristön tapahtumien ennakoiminen sekä polttoainekulutuksen seuranta. (Karhunen et al. 2008: 121.) Tyhjänä ajoa tulisi välttää, sillä siitä aiheutuu kaluston sitomien kiinteiden kustannusten lisäksi muun muassa työkustannuksia sekä kuljetuskaluston muuttuvia kustannuksia. Meno-paluukuormien hyödyntämisellä voidaan myös estää turhien päästöjen syntyminen. (Oksanen 2004: 73.)

2.1.2 Putkikuljetusten tehokkuus

Putkikuljetus on taloudellisesti tehokas vaihtoehto, kun kuljetettava matka on keskipitkä tai pitkä. Kuljetusprosessi on hyvin pitkälle automatisoitu, ja toimintaa valvotaan keskitetysti tietoteknisten laitteiden avulla. Putkessa voidaan kuljettaa

suuria volyymeja ja toimitukset voivat tapahtua keskeytyksettä ympärivuorokautisesti. Putkikuljetuksiin liittyvät onnettomuudet ovat erittäin harvinaisia, eivätkä esimerkiksi sääolosuhteet vaikuta toimitusvarmuuteen. (How pipelines work 12.2.2011.)

2.2 Kuljetuskustannukset

Perinteisesti kuljetusyrityksen toiminnan kustannukset jaotellaan toiminta-asteen (suoritemäärä/aikajakso) mukaan muuttuviin ja kiinteisiin kustannuksiin, laskentakohteen mukaan välittömiin ja välillisiin kustannuksiin sekä tapahtuman mukaan erillis- ja yhteiskustannuksiin. Kiinteät kustannukset eivät ole riippuvaisia toiminta-asteen muutoksista, muista toiminnon aiheuttajien vaihteluista eivätkä toiminnon työmäärästä. Muuttuvat kustannukset puolestaan ovat riippuvaisia näistä tekijöistä. (Oksanen 2004: 58.)

Välillisiksi kutsutaan niitä kustannuksia, joita ei voida suoraan kohdistaa toiminnoille, tuotteille tai asiakkaille, vaan ne joudutaan kohdistamaan välillisesti resurssista hyötyvien toimintojen tai kustannusobjektien kesken. Välittömät kustannukset taas ovat syy-yhteyden perusteella suoraan kohdistettavissa. Yhteiskustannuksiksi katsotaan ne kustannukset, jotka ovat yhteisiä usealle laskentakohteelle, toiminnolle tai tuotteelle. Yhteiskustannuksiin ei vaikuta esimerkiksi yksittäisen tuotteen tai asiakkaan poisjääminen eivätkä suoritemäärän muutokset. Erilliskustannukset puolestaan jäävät kokonaan pois, mikäli kyseistä toimintoa ei suoriteta. (Oksanen 2004: 58.)

Kustannus voi olla samanaikaisesti sekä muuttuva, välitön että erilliskustannus. Esimerkiksi ajoneuvon polttoainekustannus on välittömästi kohdistettavissa kyseiselle ajoneuvolle polttoaineen kulutuksen perusteella. Se myös riippuu ajoneuvon toiminta-asteesta ja suoritemäärästä, ja jää pois, mikäli ajoneuvo poistetaan käytöstä. Tietty kustannus voi olla samaan aikaan kiinteä, välillinen ja yhteiskustannus. Esimerkiksi kuljetusyrityksen toimiston vuokra ei riipu ajoneuvojen toiminta-asteesta eikä toimintojen vaihteluista, se joudutaan välillisesti jakamaan yrityksen kuljetussuoritteiden kesken ja se on yhteinen kaikille kuljetusyrityksen laskentakohteille ja toiminnoille. (Oksanen 2004: 59.)

Vaikka eri kuljetusmuotojen kustannusrakenteet poikkeavat toisistaan, voidaan kustannuslajit jakaa viiteen pääryhmään: kuljetustyökustannuksiin, kuljetuskaluston

kustannuksiin, kuljetusorganisaation kustannuksiin, tavarankäsittelykustannuksiin ja väyläkustannuksiin. Kaikki sellaiset tuotantopanosten käytöstä aiheutuvat kustannukset, jotka osallistuvat tavalla tai toiselle kyseisen kuljetusvälineen tuotoksen aikaansaamiseen, kohdistetaan aiheuttamisperiaatteella kuljetusvälineelle. (Oksanen 2004: 60.)

Tässä työssä tarkastellaan yksityiskohtaisemmin maantie- ja putkikuljetusten kustannuksia, sillä ne ovat työn empiirisen tutkimuksen kannalta keskeiset kuljetusmuodot.

2.2.1 Maantiekuljetusten kustannukset

Maatiekuljetuksia suorittavan kuljetusyrityksen kustannustekijät voidaan jakaa työkustannuksiin sekä ajoneuvon kiinteisiin ja muuttuviin kustannuksiin. Joskus esimerkiksi kuljetustyökustannuksia ja tavarankäsittelykustannuksia on vaikea erotella toisistaan, sillä samat toiminnot saattavat olla kustannuksiltaan erilaisia riippuen siitä kenelle ja mihin ne kohdistetaan. Esimerkiksi autonkuljettajan suorittama tavarankuormaus ja purku ja tästä aiheutuvat työkustannukset lasketaan kuljetuskustannuksiksi. Jos tämän saman työn tekee esimerkiksi terminaalihenkilöstö, kustannukset lasketaan tavarankäsittelykustannuksiksi, tällöin tavarankäsittelystä muodostuu oma toiminto joka palvelee kuljetustoimintoa. Kyseessä on toimintoryhmälle tai -kokonaisuudelle (järjestelmäkustannukset) kuuluvat kustannukset, jotka muodostuvat kohdistamalla kaikki resurssikustannukset (ensi- ja toissijaiselle) toiminnoille ja tämän jälkeen toimintoryhmälle ja -kokonaisuudelle. (Oksanen 2004: 62.)

2.2.2 Putkikuljetusten kustannukset

Putkikuljetusten kustannukset muodostuvat pääomakustannuksista ja käyttökuluista. Yleensä putken rakentamisen investointikustannukset ovat suuret ja muuttuvat kustannukset alhaiset.

2.3 Kuljetusten ympäristövaikutukset

Logistiikkaa kutsutaan usein ”poikkitieteelliseksi” alaksi, mikä tarkoittaa, ettei mikään yksittäinen filosofinen suunta pysty perustelemaan kaikkia logistiikkaan liittyviä

ongelmia. Logistiikan vaikutusta ympäristöön voidaan tarkastella monista eri näkökulmista. Merkittävimpiä liikenteen aiheuttamia ympäristöongelmia ovat päästöt, melu, tärinä ja ympäristömuutokset kuten kasvihuoneilmiö. Moottoritie ei esimerkiksi ole esteettisessä mielessä kaunis näky ja tien rakentaminen on vaikuttanut alueen luonnon rakenteeseen. Autojen pakokaasupäästöt ovat haitallisia terveydelle ja melu ja tärinä alentavat ihmisten sekä eläinten viihtyvyyttä. Taloudellisessa mielessä autot kuluttavat jatkuvasti fossiilisia polttoaineita. (Hokkanen et al. 2004: 297.)

Tässä työssä tarkastellaan lähemmin työn empiirisen tutkimusosion kannalta olennaisten kuljetusmuotojen, maantie- ja putkikuljetusten ympäristövaikutuksia.

2.3.1 Maantiekuljetusten ympäristövaikutukset

Liikenteen aiheuttamien ympäristöongelmien tutkimus ja ympäristöhaittojen torjuminen ovat nousseet tärkeäksi osaksi tieliikenteen harjoittamista 1990-luvulta lähtien. Hiilidioksidipäästöjen pienentämiseksi ja muun kestäväen kehityksen tavoitteiden saavuttamiseksi maailmanlaajuisesti on solmittu kansainvälinen ilmastopöytäkirja, jonka Suomi ratifioi vuonna 1994. Vuonna 1989 solmitun Sofian sopimuksen tavoitteena ovat typenoksidien rajoittaminen ja Rion sopimuksessa (1992) ja Kioton pöytäkirjassa (1997) on asetettu kasvihuonekaasujen vähentämisvelvoitteet teollisuus- ja siirtymätalousmaille. Tiekuljetusyritysten kansainvälinen etujärjestö IRU (International Road Transport Union) julkaisi vuonna 1996 oman kestäväen kehityksen turvaamisen julkilausuman, jonka alan suomalaiset järjestöt ovat myös allekirjoittaneet. (Karhunen et al. 2008: 111.)

Raskaiden ajoneuvojen liikkuminen aiheuttaa muun liikenteen tavoin väistämättä monenlaisia ympäristöhaittoja. Kuten jäljempänä tässä tutkimuksessa kestäväen kehityksen luvussa mainitaan, osalla ympäristöhaitoista on pitkäaikaisia vaikutuksia, osa vaikuttaa hetkellisesti. Tiedetyt liikenteen ympäristöhaitat vaikuttavat paikallisesti, toiset taas jopa maailmanlaajuisesti. Paikalliset haitat ilmenevät muun muassa ihmisten terveyshaittoina, alueellisesti ne kohdistuvat rasituksena luontoon ja maailmanlaajuisesti vaikutuksena ilmastoon. (Karhunen et al. 2008: 112.)

Ympäristöhaittoja voidaan torjua erilaisin keinoin. Osaa haitoista pystytään pienentämään tekniikkaa ja polttoaineita kehittämällä, osalta voidaan suojautua ja osaan voidaan vaikuttaa esimerkiksi rajoittavin säädöksin sekä kuljetuksia ja

liikennettä tehostamalla. Kuljetusten ympäristöhaittojen kehittymistä voidaan arvioida absoluuttisen kokonaismäärän ja suhteellisen kehityksen valossa. (Karhunen et al. 2008: 112.)

Melu ja tärinä

Maantiekuljetuksista aiheutuu väistämättä melua. Melulla tarkoitetaan ääntä, joka luonteensa tai voimakkuutensa perustella aiheuttaa häiriötä ympäristölleen.

Maantieliikenteessä eniten ääntä synnyttävät ajoneuvojen moottorit, renkaat sekä korirakenteiden liikkuminen. Tieliikenteen aiheuttamaa melua pyritään hillitsemään sekä lainsäädännön että infrastruktuurin avulla. Pinta-asfaltin rakenne ja tasaisuus vaikuttavat rengasmelun määrään ja laatuun. Tielinjaus ja kalliioleikkaukset puolestaan vaikuttavat melun voimakkuuteen ja sen leviämiseen. Erityisesti taajamissa melun alentaminen on erittäin tärkeää asumismukavuuden säilyttämiseksi. (Hokkanen et al. 2004: 306.)

Raskaan liikenteen kasvanut määrä ja ajoneuvojen akselipainojen kasvu lisäävät liikenneväylien ja ratojen varsien tärinäongelmia (Liikenteen melu ja tärinä 12.11.2010). Raskas liikenne aiheuttaa voimakasta maan vavahtelua silloin, kun tie on rakennettu pehmeälle maaperälle. Nopeuksien alentaminen vähentää tärinää, mutta siitä voidaan päästä kokonaan eroon ainoastaan laajoilla infrastruktuurin muutoksilla, kuten teiden paaluttamisella. (Karhunen et al. 2008: 189.)

Päästöt

Maantiekuljetusten vaikutukset ympäristöön muodostuvat ajoneuvojen valmistuksen, käytön ja käytöstä poiston yhteydessä. Ajoneuvojen käyttö synnyttää päästöjä, jotka aiheuttavat ympäristökuormitusta.

Liikenteen ympäristöön aiheuttama kuormitus on niin kutsuttua hajakuormitusta. Hajakuormituksen arviointi on hankalaa, sillä päästöjen aiheuttajien määrä vaihtelee, ja esimerkiksi saman liikennevälineen eri mallit ja jopa eri yksilöt aiheuttavat toisistaan poikkeavia päästöjä. Eri kuljetusmuotojen ilmaan kohdistuvat päästöt poikkeavat toisistaan merkittävästi. Kuljetusmuodosta riippumatta hiilidioksidi on suurin liikennepäästöjen aiheuttaja noin 97 % osuudella kokonaismäärästä. (Hokkanen et al. 2004: 298, 299–303.)

2.3.2 Putkikuljetusten ympäristövaikutukset

Ympäristövaikutukset kartoitetaan jokaisen kaasuputkihankkeen kohdalta. Viranomaisen voi vaatia erillistä ympäristövaikutusten arviointimenettelyä (YVA), jos hanke on laaja. Ympäristövaikutusten arviointimenettelyyn kuuluu julkinen kuuleminen. Useimmiten kattava ympäristöselvitys riittää, eikä YVA -menettely ole tällöin tarpeen. Ympäristöselvityksessä arvioidaan miten putken rakentaminen, käyttö ja käytöstä poisto vaikuttavat ympäristöön, kuten alueen pinta- ja pohjavesiin. Selvitys sisältää lisäksi maininnan alueen arvokkaista luontokohteista ja lajiesiintymistä sekä kartoituksen kulttuurimaisemasta ja arkeologisista kohteista alueella. Alueellinen ympäristökeskus toimii viranomaisena ympäristövaikutusten arvioinnissa. Ympäristöselvityksen avulla pyritään valitsemaan ympäristön kannalta putken paras linjaus. Myös putken rakennusmenetelmät ja ajankohta pyritään valitsemaan siten, ettei ympäristö vahingoittuisi. (Maakaasuputkiston rakentaminen: 8 16.9.2010.)

YVA-lain muutos ja uusi YVA-asetus astuivat voimaan vuonna 1999. YVA-menettelyä sovelletaan tapauksissa, joissa kaasuputken halkaisija on yli 800 millimetriä (DN800) ja pituus yli 40 kilometriä. Halkaisijaltaan pienemmille putkille tehdään YVA-lain 25. §:n selvilläolovelvollisuuden mukainen ympäristöselvitys. (Skaffari 1999: 44.)

Maakaasuputkihankkeiden välittömiä ja välillisiä vaikutuksia arvioidaan erityisesti linjauksen lähistöllä sijaitsevilla asunto- ja pohjavesialueilla sekä muissa vastaavissa kohteissa. Suuri osa putkilinjan ja kompressoriasemien vaikutuksista on paikallisia. Ainoastaan hiilidioksidi- ja metaanipäästöillä vaikutus on laajempi. (Skaffari 1999: 45.)

Suunnitteluvaiheessa pyritään maakaasuputkelle löytämään yleisesti hyväksyttävä ja maanomistajia mahdollisimman tasapuolisesti kohteleva sijoitus. Putken sijainnin osalta pyritään huomioimaan rakentamisolosuhteet, kuten maaperä ja sen nykyinen sekä mahdollisuuksien mukaan myös tuleva käyttö. Maisema-, luonto- ja kulttuurikysymykset ovat esillä jo suunnittelun alkuvaiheessa. Putken rakentamisen vaatimukset, käyttöturvallisuus ja kustannukset ovat myös tärkeitä huomioon otettavia seikkoja. (Skaffari 1999: 45.)

Keskeisimmät maakaasuputken ympäristöön kohdistuvat vaikutukset ovat rakentamisen aikaiset, käytön aikaiset sekä pysyvät vaikutukset ympäristöön (Skaffari 1999: 45).

2.3.2.1 Rakentamisen aikaiset vaikutukset

Maakaasuputkiston rakentamispaikaksi sopii sekä pelto että metsä. Vesialueilla putki asennetaan yleensä joen tai järven pohjaan. Maakaasuputken rakentamiseen tarvittava maa-alueen käyttöoikeus hankitaan maanomistajilta lunastuslain perusteella. Maakaasuputken rakentaminen on maarakennushanke, jossa kaivetaan ja siirretään maa-aineksia ja louhetta. Rakentamisen aikana suurimmat vaikutukset ovat rakennustoiminnan aikana lisääntyvä liikenne sekä maa-ainemassojen ja louheen sijoittamisesta johtuvat maisemalliset vaikutukset. Liikennettä ja putken asennusta varten tarvitaan maastoon asennustie, joka seuraa putken linjausta. (Skaffari 1999: 45.)

Putken rakentaminen vaatii maastossa normaalisti noin kahdenkymmenen metrin levyisen työalueen. Tältä alueelta kaadetaan puut, ja pintakasvillisuus vaurioituu. Työalueen tulee olla leveämpi teiden ja vesistöjen alituksissa. Rakentamisen vaatimaa työaluetta voidaan erityiskohteissa myös kaventaa. Käytännössä tämä tarkoittaa esimerkiksi puiden kaatamatta jättämistä ja suojaamista sekä kaivuumaiden poiskuljettamista. Kallioiden kohdilla putkilinjan paikka joudutaan louhimaan. Putken kaivamisesta maahan syntyy niin kutsuttuja läjitysmassoja, jotka sijoitetaan linjalle sopiviin maastonkohtiin. Läjitysalueet ja rakentamisesta maastoon syntyneet muut vauriot maisemoidaan rakentamisen lopuksi. (Skaffari 1999: 45.)

Peltoalueita ei voida viljellä rakennustyön aikana ja rakennustyö vaikuttaa peltoviljelyyn vielä seuraavana vuonna putkilinjan valmistumisen jälkeen. Aiheutuneet vahingot ja haitat korvataan asianomaisille. Ennen kaivamisen aloittamista pellon ruokamulta kaavitaan työmaa-alueelta erillisiin välivarastoihin. Savi, sora ja muu kivennäismaa varastoidaan asennustyön ajaksi putken viereen. (Skaffari 1999: 45.)

Putken asennusta varten rakennettu tie puretaan pois pellolta sekä pääsääntöisesti metsästä ennen maisemointityön aloittamista. Kun putki on asennettu, kaivanto peitetään ensin kivennäismaalla ja pellon salaojat rakennetaan ennalleen. Tämän

jälkeen multa tasoitetaan kaivannon päälle ja pellon normaali viljely voidaan aloittaa. (Skaffari 1999: 45.)

Maakaasuputken rakentamisen aikana pintavesien virtaukset saattavat muuttua putkien välittömässä läheisyydessä. Pohjavesialueet ja yksittäiset kaivot tutkitaan linjauksen alueella ennen rakentamista. Rakentamisen vaikutuspiiriin jäävistä kaivoista tehdään kaivokortit, joista ilmenee muun muassa kaivon veden laatu ja veden pinnan korkeus. (Skaffari 1999: 46.)

2.3.2.2 Käytön aikaiset vaikutukset

Lopullinen maakaasuputkesta maastoon näkyviin jäävä käytävä on noin viiden metrin levyinen. Tälle alueelle putken omistaja lunastaa pysyvän käyttöoikeuden. Sitä lukuun ottamatta työmaan aikaiselle alueelle voidaan istuttaa metsää tai antaa metsän uudistua luontaisesti. (Skaffari 1999: 46.)

Linjaus on yleisesti pyritty sijoittamaan siten, ettei metsänreunoihin jää kauas näkyviä aukkoja, ja että suurmaisema säilyy ehjänä. Pellolla koko maakaasuputken käytävää voidaan viljellä, jolloin linjasta jäävät maisemaan näkyvin vain linjan sijaintia osoittavat merkkipaalut, jotka pyritään sijoittamaan niin, ettei niistä aiheudu haittaa maanviljelylle. Maastossa näkyvät myös aidatut venttiiliasemat, joiden avulla voidaan tarvittaessa katkaista kaasun siirto ja tyhjentää putki kaasusta. Venttiiliasemia ulkoisesti muistuttavilla kaavinaseilla taas voidaan putkeen syöttää sen kunnan tarkistava kaavin. (Skaffari 1999: 46.)

Pysyvä käyttöoikeus tarvitaan huoltotoimenpiteitä varten, jolloin muun muassa tarkistetaan linjoja kävellen tai hiihtäen, raivataan vesakoita, kunnossapidetään linjamerkintöjä, suoritetaan katodisen korroosiosuojauksen tarkastusmittauksia tai tehdään lentotarkastuksia (Skaffari 1999: 46).

Omistusoikeudella lunastetaan myös putken katodisen suojauksen edellyttämät anodikentät. Kentän koko on yleensä noin 30 x 120 m². Alueelle upotetaan maahan noin kahden ja puolen metrin syvyyteen anodeja eli maadoituselektrodeja, jotka liitetään kaapelilla putkistoon. Kaapeleiden linjaus vaatii maastossa noin viiden metrin levyisen työmaa-alueen rakennusaikanaan, ja lopullinen maastossa näkyvä käytävä on noin kahdesta kolmeen metrin levyinen. (Skaffari 1999: 46.)

Maakaasun virtaus putkessa ei normaalisti synnytä melua. Huoltotilanteissa tapahtuvaa maakaasuputken tyhjentämistä varten voidaan putkistoa tyhjentää päästämällä kaasua ulkoilmaan. Näitä ulospuhallustilanteita on sattunut hyvin harvoin koko Suomen maakaasuverkoston alueella. Ulospuhalluksesta, joka aiheuttaa voimakkaan viheltävän äänen sekä metaanipäästöjä ilmaan, pyritään tiedottamaan lähistön asukkaille etukäteen. (Skaffari 1999: 46.)

2.3.2.3 Pysyvät vaikutukset ympäristöön

Pysyväksi vaikutukseksi jää metsäalueilla noin viiden metrin levyinen puuton käytävä. Peltoalueella linjauksesta muistuttavat vain valkoiset merkkipaalut. Maakaasuputki asettaa maankäytölle normaalisti seuraavia rajoituksia:

- Linjalle ei saa rakentaa eikä varastoida tavaraa
- Puuta ei saa istuttaa eikä kasvattaa maakaasulinjan pysyvällä käyttöoikeusalueella
- Räjähdyttämisen tai räjähdysaineiden säilyttäminen lähempänä kuin 30 metriä maakaasuputkesta ei ole sallittu
- Tehtäessä maankaivuutöitä alle viiden metrin etäisyydellä maakaasuputkesta on työhön saatava putken omistajan lupa
- Linjan läheisyyteen ei saa rakentaa putken suuntaista suurjännitesähkölinjaa tai rautatietä, sillä katodinen suojaus saattaisi häiriintyä (risteämiä sallitaan). (Skaffari 1999: 46.)

3 KESTÄVÄ KEHITYS

Kestävän kehityksen käsite on noussut esiin kansainvälisessä mittakaavassa 1980-luvun lopulla, jolloin ympäristön ja kehityksen maailmankomissio (niin kutsuttu Brundtlandin komissio) julkaisi raportin ”Yhteinen tulevaisuutemme”. Komission määritelmän mukaan ”kestävä kehitys on sellaista kehitystä, joka täyttää nykyisten sukupolvien tarpeet vaarantamatta kuitenkin tulevien sukupolvien mahdollisuutta tyydyttää omat tarpeensa”. Kyseinen määritelmä on hyväksytty kansainvälisesti niin useiden valtioiden hallituksissa kuin yritysmaailmassa. Kestävän kehityksen perustana on ihmiskeskeinen ajattelu, joka kohdistuu ihmisen tarpeisiin ja niiden tyydyttämiseen liittyviin reunaehtoihin. Kestävän kehityksen perustan ajatellaan muodostuvan näiden

reunaehtojen muodostamasta ekologisesta, sosiaalisesta ja taloudellisesta ulottuvuudesta. (Rohweder 2004: 15.)

Sosiaalinen ulottuvuus puolestaan koskee ihmisten hyvinvointiin vaikuttavia tekijöitä, kuten yhteiskuntien oikeudenmukaisuutta ja turvallisuutta. Sosiaalisen ulottuvuuden yhtenä osana on kulttuurinen kestävyys, joka tarkoittaa kulttuurien moninaisuuden ja erilaisuuden kunnioittamista sekä kunkin kulttuurin mahdollisuuksia kehittyä omilla ehdoillaan. (Rohweder 2004: 15.)

Taloudellinen kestävyys liittyy taloudelliseen pääomaan ja terveeseen, pitkällä ajanjaksolla kannattavaan toimintaan, joka huomioi sekä ympäristö- että sosiaaliset näkökohdat. Yrityksen toiminta on kestävä kehityksen periaatteiden mukaista, jos sen toiminta pohjautuu tähän päämäärään. Kestävää kehitystä edistävä yritys on aktiivisessa ja avoimessa vuorovaikutuksessa toimintaympäristönsä kanssa. Toimintaympäristön jatkuvat muutokset antavat yritykselle haasteita osallistua omalta osaltaan kestävä kehityksen edistämiseen niin paikallisesti, alueellisesti kuin globaalisti. Vuorovaikutus on kaksisuuntaista: yritys vaikuttaa päätöksillään toimintaympäristöön, ja toisaalta toimintaympäristö muokkaa yrityksen toimintaa. (Rohweder 2004: 15–16, 31.)

Ekologinen ulottuvuus liittyy luontoon ja sen monimuotoisuuden turvaamiseen niin, että ekosysteemit ja niiden lajit säilyvät ja pitävät maapallon mahdollisimman hyvänä ympäristönä myös tuleville sukupolville. (Rohweder 2004: 15.)

Ympäristöön kohdistuvien ongelmien laajuus vaihtelee, erään luokittelun mukaan ongelmat voidaan jakaa niiden maantieteellisen laajuuden perusteella paikallisiin, alueellisiin ja globaaleihin (taulukko 1). Tästä luokittelusta on hyötyä pohdittaessa mahdollisia ratkaisuja ympäristöongelmiin. Paikalliset ongelmat rajautuvat pienelle maantieteelliselle alueelle, esimerkkinä huoltoasemalta maaperään kulkeutuvat saasteet ja jätteet. Alueelliset ympäristöongelmat puolestaan koskevat astetta laajempia alueita, esimerkiksi jokilaaksoja tai valuma-alueita. Esimerkkinä tästä voidaan mainita Itämeren rehevöityminen. Paikalliset ja alueelliset ongelmat voidaan ratkaista paikallisella päätöksenteolla tai esimerkiksi naapurivaltioiden välisen yhteistyön kautta. Nykyään eniten huomiota julkisessa keskustelussa saavat globaalit ympäristöongelmat. Ihmisten tietoisuus niistä on kasvanut erityisesti kasvihuoneilmiöstä käytävän keskustelun ansiosta. (Rohweder 2004: 45–50.)

Taulukko 1. Esimerkkejä ympäristöongelmista ja niiden aiheuttajista maantieteellisesti luokiteltuina (Rohweder 2004: 49)

Maantieteellinen vaikutusalue	Ympäristöongelma / vaikutus	Mahdollinen aiheuttaja
Paikallinen	Maaperän saastuminen	Rakentaminen, viemäröinti, ympäristömyrkyt
	Melu	Liikenne
	Jäte	Kulutus
	Pohjaveden saastuminen ja ehtyminen	Rakentaminen, viemäröinti, kuivaukset, liiallinen kasteluveden käyttö
Alueellinen	Vesien rehevöityminen	Maatalouden lannoitteet, kalanviljely (fosfori ja typpiyhdisteet)
	Happamoituminen (maa, ilma tai vesi)	Sähkön ja lämmön tuotanto, liikenne (fossiiliset polttoaineet)
Globaali	Kasvihuoneilmiö	Sähkön ja lämmön tuotanto, liikenne (fossiiliset polttoaineet)
	Otsonikato (yläilmakehässä)	Freonit, halonit, muut klooratut komponentit
	Luonnon monimuotoisuuden väheneminen	Elinympäristöjen tuhoutuminen ja muuttuminen

Maailmanlaajuisesti tarkasteltuna huomio keskittyy 2000-luvulla kasvihuoneilmiöön, jonka rajoittamistoimenpiteet ovat vasta alussa. Kasvihuoneilmiön hallinta ja ilmastomuutoksen torjuminen tulevat muuttamaan maailman energiajärjestelmiä merkittävästi. Energiantuotannon merkittävimmät vaikutukset muodostuvat nykyisen käsityksen mukaan ilmaan kohdistuvista päästöistä. Energiantuotannon aiheuttamat paikallisen tason ympäristövaikutukset on kehittyneissä maissa saatu rajattua melko alhaiselle tasolle, pois lukien liikenteen päästöt, jotka heikentävät suurten kaupunkien ilmanlaatua. (VTT Prosessit 2004: 137.)

Tärkeimmät tekniset keinot fossiilissyntyisten hiilidioksidipäästöjen vähentämisessä ovat

- energian käytön tehokkuuden parantaminen teollisuudessa, liikenteessä, kaupallisella sektorilla ja asumissektorilla
- energian tuotannon hyötysuhteen parantaminen (esimerkiksi yhdistetty sähkön ja lämmön tuotanto sekä aiempaa korkeampi hyötysuhde sähkön tuotannossa)
- siirtyminen vähemmän hiiltä sisältävien polttoaineiden kuten maakaasun käyttöön

- siirtyminen uusiutuvien energialähteiden kuten biokaasun käyttöön. (VTT Prosessit 2004: 143.)

International Energy Agencyn (IEA) vuonna 2010 julkaiseman World Energy Outlookin mukaan hiilidioksidin talteenotto (CCS, Carbon Capture and Storage) tulee vuoteen 2035 mennessä olemaan toiseksi tärkein keino hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi. Tärkeimpänä keinona nähdään polttoaineiden ja sähkön loppukäytön energiatehokkuuden parantaminen. (Siitonen 17.11.2010.)

Hiilidioksidipäästöjä voidaan ohjata lähinnä rakenteellisilla muutoksilla energian tuotannossa tai laajoille alueille jakautuvilla teknisillä parannuksilla sekä energian kulutuksessa että sen tuotannossa. Tästä johtuen taloudellisia ohjauskeinoja pidetään sopivina hiilidioksidipäästöjen rajoittamiseen: verotuksen tavoitteena on luoda kilpailukykyä niille energiantuotantomuodoille, jotka aiheuttavat vain vähän tai ei lainkaan hiilidioksidipäästöjä. Verojen lisäksi toinen merkittävä ohjauskeino on taloudellinen tuki, joka ohjataan vähäpäästöistä energiantuotantoa harjoittaville tahoille joko suoraan investointeihin tai tekniikan kehittämiseen. (VTT Prosessit 2004: 147.)

Vuodesta 2005 lähtien myös Euroopan unionin päästökauppa (EU ETS, EU Emissions Trading Scheme) on ollut merkittävä ohjauskeino, joka tähtää siihen että päästöjä vähennetään siellä, missä se on taloudellisesti kannattavinta (Siitonen 17.11.2010).

3.1 Energiapolitiikka

Uusimmassa hallitustenvälisen ilmastopaneelin (engl. Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) arviointiraportissa neljä sanotaan, että maapallon lämpeneminen on tosiasia. Viimeisimmän sadan vuoden aikana maapallon keskilämpötila on noussut 0,74 °C, merenpinta on kohonnut ja jää- ja lumipeitteet ovat pienentyneet. Ilmaston lämpeneminen johtuu valtaosin maapallon kasvihuoneilmiön voimistumisesta. Sivulla 22, taulukossa 1 kasvihuoneilmiö tuodaan esille globaalina ongelmana, jonka syiksi luetellaan sähkön ja lämmön tuotanto sekä liikenteen fossiiliset polttoaineet. Hiilidioksidin ja muiden kasvihuonekaasujen määrät ovat lisääntyneet ilmakehässä ihmisten toiminnan seurauksesta, mikä puolestaan on voimistanut kasvihuoneilmiötä. (Ilmastonmuutos 29.10.2010.) Ilmastonmuutos

vaikuttaa maailmanlaajuisesti ja vaikutusten suuruus riippuu päästöjen määristä ja tulevaisuuden päästökehityksestä. Päästöjä pyritään vähentämään erilaisin keinoin kansainvälistä yhteistyötä hyödyntäen. (Ilmastonmuutoksen hillitseminen 29.10.2010.)

YK laati ilmastopöytäkirjan vuonna 1994. Sopimuksen päämääränä on saada ilmakehän kasvihuonekaasujen määrä vaarattomalle tasolle. Ilmastopöytäkirjan Kioton pöytäkirja tuli voimaan vuonna 2005. Kioton pöytäkirja vaatii teollisuusmaita vuosien 2008–2012 aikana pienentämään kuuden kasvihuonekaasun päästöjä yhteensä 5,2 prosenttia vuoden 1990 tasosta. Suomi on sitoutunut ilmastopöytäkirjaan ja Kioton pöytäkirjaan. Neuvottelut vuoden 2012 jälkeisestä sopimusjärjestelmästä ovat käynnissä ja ympäristöministeriöllä on koordinoitavastuu YK:n ilmastopöytäkirjan ja Kioton pöytäkirjan alaisista ilmastoneuvotteluista Suomessa. (Ilmastonmuutoksen hillitseminen 29.10.2010.)

Marraskuussa 2008 Suomessa valmistui pitkän aikavälin ilmasto- ja energiastrategia, jossa määritellään perusteellisesti keskeiset tavoitteet ja linjaukset vuoteen 2020 ja visiot vuoteen 2050 asti. Kansallisia ilmastopoliittisia tavoitteita käsitellään valtioneuvoston vuonna 2009 hyväksymässä ilmasto- ja energiapoliittisessa tulevaisuudenselonteossa. Selonteossa käsitellään pitkän aikavälin ilmasto- ja energiapolitiikkaa vuoteen 2050 asti sekä ehdotetaan ilmastopoliittisia toimenpiteitä. Raporttiin on kirjattu Suomen tavoitteeksi, osana kansainvälistä yhteistyötä, vähentää ilmastopäästöjä ainakin 80 prosenttia vuoden 1990 tasosta vuoteen 2050 mennessä.

Ympäristöministeriö on ollut valmistelemassa pitkän aikavälin ilmasto- ja energiastrategiaa ja tulevaisuudenselontekoa. (Ilmastonmuutoksen hillitseminen 31.10.2010.) Euroopan unionin sisällä päästövähennystavoite on jaettu jäsenmaiden kesken ja tässä taakanjaossa Suomen tavoite on vähentää päästöt kaudella 2008–2012 samalle tasolle kuin ne olivat vuonna 1990 (Suomella ei vähennysvelvoitteita) (Siitonen 17.11.2010).

Suomen valtioneuvoston vuonna 2008 hyväksymän ilmasto- ja energiastrategian tavoitteena on lisätä uusiutuvan energian käyttöä kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi. Uusiutuvan energian käytöllä on vaikutuksia myös muilla ilmasto- ja energiastrategian toimenpideosa-alueilla, kuten bio- ja muun kotimaisen energian käytön lisäämisessä, tutkimukseen ja tuotekehitykseen panostamisessa ja

energiasektorin huoltovarmuuden ylläpitämisessä. (Uusiutuva energia 5.11.2010.)
Tavoitteena on, että uusiutuvan energian määrä Suomen energiantuotannosta kasvaa vuosien 2005–2020 aikana 9,5 %-yksikköä. Tällöin uusiutuvan energian osuus olisi 38 % Suomen energiankulutuksesta, kun sen osuus vuonna 2005 oli 28,5 %. (Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2009/28/EY 23.4.2009.)

IPCC antaa tietoa ilmastonmuutoksen vaikutuksista, taustasta ja hillitsemisestä.
IPCC:n uusin ilmastonmuutoksesta kertova raportti on Neljäs arviointiraportti (Fourth Assessment Report), Viidennen raportin on tarkoitus valmistua vuosina 2013–2014.
Ympäristöministeriön nimittämän kansallisen IPCC-työryhmän vetäjänä on Ilmatieteen laitos. Työryhmän tarkoituksena on edistää ja koordinoita IPCC-työtä Suomessa. (Ilmastonmuutoksen hillitseminen 31.10.2010.)

3.2 Energiatehokkuus

Ilmastopolitiikan lisäksi energian säästäminen on tärkeää myös perinteisistä syistä – muun muassa energian saatavuuden turvaaminen, energiakustannusten alentaminen ja muut ympäristönäkökohdat on otettava huomioon (Energiatehokkuus 27.10.2010).
Euroopan unionin energiategokkuustavoite on vuoteen 2020 mennessä vähentää primäärienergiankulutusta (niin kutsuttu baseline-kulutus) 20 prosentilla tämänhetkisestä vuoden 2020 kulutusennusteesta. (Siitonen 17.11.2010). Suomi on kansainvälisesti yksi johtavista maista monissa energiansäästötoimissa ja energiankäytön tehokkuudessa. Tuloksellista energiansäästöä on esimerkiksi sähkön ja lämmön yhteistuotanto, vapaaehtoisten energiategokkuussopimusten kattavuus ja energiakatselmusten järjestelmällinen toteuttaminen. (Energiategokkuus 27.10.2010.)

Energiankulutusta pyritään vähentämään tehostamalla energiantuotantoa ja -kulutusta ja toteuttamalla erilaisia säästötoimia, mutta tästä huolimatta kaikilla toimialoilla on vielä paljon tehtävää (Energiategokkuus ja ympäristö 27.10.2010).

Energiategokkuuden parantaminen tarkoittaa sitä, että tuotteen tai palvelun tuottamiseen käytetyn energian ominaiskulutus laskee, mikä puolestaan antaa yrityksille ja yhteisöille taloudellista hyötyä ja samalla vähentää ympäristöön syntyviä päästöjä. Energiansäästö tarkoittaa, että energian kulutus vähenee absoluuttisesti mitattuna tietyllä ajanjaksolla. (Siitonen 17.11.2010.)

Energiatehokkuutta käsitellään muun muassa ympäristölupaprosessin yhteydessä, sillä ympäristösuojelulain mukaan muiden ympäristövaikutusten lisäksi on tarkasteltava energiatehokkuuden kehitystä. Sitomalla energiansäästö ympäristöjärjestelmän osaksi säästetään energiaa ja saadaan luotettavaa tietoa energia- ja ympäristöraportteihin energian kulutuksesta. (Energiatehokkuus ja ympäristö 27.10.2010.)

3.3 Hiilijalanjälki

Hiilijalanjälki (engl. carbon footprint) on ilmastovaikutusten mittari, jota käytetään valtiotasolta yksittäisten yritysten, henkilöiden tai tuotteiden ilmastokuorman mittaamiseen. Mittari kertoo, kuinka paljon tietystä tuotteesta tai toiminnasta syntyy kasvihuonekaasupäästöjä. (Hiilijalanjälki 22.10.2010.)

Hiilijalanjälki terminä voi tarkoittaa suoria tai epäsuoria hiilidioksidipäästöjä tai kaikkia kasvihuonekaasuja hiilidioksidiekvivalenteiksi muunnettuna. Hiilijalanjälki voidaan mitata tuotteen koko elinkaaresta, kalenterivuodesta tai yhdestä yksittäisestä toiminnosta. Tulos ilmoitetaan massana, yksikkönä on gramma, kilogramma tai tonni hiilidioksidiekvivalenttia. Esimerkiksi henkilöautojen g CO₂/km-merkki ilmaisee polttoaineen poltosta syntyvien suorien hiilidioksidipäästöjen määrän, kun taas esimerkiksi huonekalussa merkintä 7,5 kg CO₂e tarkoittaa sen koko elinkaaren (materiaalit, valmistaminen, jakelu, hävittäminen) aikana syntyneitä suoria ja epäsuoria kasvihuonepäästöjä. Muiden kasvihuonekaasujen (metaanin ja dityppioksidin) päästöt voidaan muuntaa hiilidioksidipäästöiksi niin kutsutun lämmitysvaikutuskertoimen avulla: yksi kilo metaania vastaa lämmitysvaikutukseltaan 25 ja yksi kilo dityppioksidia (N₂O) 298 kiloa hiilioksidia. (Hiilijalanjälki 22.10.2010.)

Hiilijalanjälki on toimiva mittari, sillä sitä on helppo tulkita. Erilaiset toiminnot esimerkiksi sähköstä jätteisiin saadaan sen avulla yhteismitallisiksi, minkä jälkeen niitä on helppo verrata keskenään. Hiilijalanjälki keskittyy ainoastaan mittaamaan eri toimintojen vaikutusta ilmastonmuutokseen, mutta sitä ei ole kuitenkaan yksinkertaistettu liikaa niin että, mittarin luotettavuus ja käyttökelpoisuus olisi kärsinyt. (Hiilijalanjälki 22.10.2010.) Ekologinen jalanjälki taas on laajempi ympäristövaikutusten mittari (Siitonen 17.11.2010).

Liikenne aiheuttaa noin neljäsosan Suomen hiilidioksidipäästöistä. Fossiiliset polttoaineet ovat yksi globaalisten ympäristöongelmien aiheuttajista (kts. taulukko s. 22). Tieliikenne on suurin liikenteen päästöjen lähde. Huolimatta liikennemäärien kasvusta, liikenteen aiheuttamat päästöt ovat pienentyneet 1990-luvulla johtuen uusien autojen ekologisemmasta suunnittelusta. CO₂-päästöt eivät ole nousseet aivan samassa suhteessa suoritemäärän kanssa. (Liikenteen päästöt 5.1.2011.)

Yli 90 % kuljetusten energiankulutuksesta koostuu maantiekuljetusten bensiini- ja dieselpolttoaineiden käytöstä. Bensiinin kulutuksen väheneminen alkoi 1990-luvun alussa ja jatkuu yhä autojen polttoaineteknologian kehittyessä. (Finland's Fifth National Communication under the United Nations Framework Convention on Climate Change 2009: 145).

Hiilijalanjälki on valittu tähän työhön yhdeksi vertailukriteeristä, sillä kuten edellä on mainittu, liikenne on suurin ilmaan kohdistuvien päästöjen aiheuttaja, ja parantamalla kuljetusten energiatehokkuutta on mahdollista vaikuttaa ilmastonmuutokseen.

4 MAAKAASU JA BIOKAASU

Suomessa ei ole maakaasuvaroja, mutta se sijaitsee merkittävien maakaasuvaltioiden, Venäjän ja Norjan lähellä. Venäjän alueella on 33 % maailman tällä hetkellä tiedossa olevista kaasuvaroista. Todetut maakaasuvarat Venäjällä ovat yli 48 000 miljardia m³ ja Norjassa 3 000 miljardia m³. Maailman kaasuvaroista Euroopan unionin osuus on 2,2 %. Venäjältä, Algeriasta ja Turkista tuodaan Eurooppaan maakaasua ja Pohjanmeren maakaasuesiintymiä hyödynnetään Isossa-Britanniassa. (Maakaasuvarat 1.9.2010.) Nesteytettyä maakaasua tuottavat Afrikan ja Lähi-idän valtiot, ja ostomarkkinoilla ovat Euroopan lisäksi Yhdysvallat sekä Aasia (Forsström 2009:31). Maakaasun arvioidaan riittävän ainakin sadaksi vuodeksi, jos kulutus jatkuu nykytasolla (Maakaasuvarat 1.9.2010).

Maakaasu on väritöntä ja myrkytöntä, puolet ilmaa kevyempää luonnonkaasua. Maakaasun tehollinen lämpöarvo on 36MJ/m³, eli yksi kuutiometri maakaasua vastaa lämpöarvoltaan yhtä litraa kevyttä polttoöljyä. Maakaasun koostumuksessa on eroja riippuen sen alkuperästä, esimerkiksi Länsi-Siperiasta Suomeen tuleva maakaasu on

puhdasta ja tasalaatuista sisältäen metaania 98 % ja loput kaksi prosenttia etaania sekä typpeä. Maakaasu sisältää pieniä määriä propaania, hiilidioksidia ja happea, ei juurikaan rikkiä eikä lainkaan pölyä tai raskasmetalleja. Maakaasun poltosta syntyy hiilidioksidia, vesihöyryä ja typenoksideja. (Maakaasu 1.9.2010.)

Jalostettu eli epäpuhtauksista ja haitallisista komponenteista puhdistettu biokaasu vastaa teknisesti maakaasua (MOBE – Biokaasukonseptin kehittäminen, tekninen esiselvitys: 1). Biokaasulla voidaan korvata fossiilisia polttoaineita. Se on ympäristöystävällinen, kotimainen ja uusiutuva energialähde. Monet raaka-aineet, jotka muutoin aiheuttaisivat ympäristölle haittaa, voidaan käyttää hyödyksi biokaasun tuotannossa, esimerkiksi erilliskerätty jäte, yhdyskuntaliete, karjan lanta ja haittakasvit. Biokaasulaitoksissa näistä raaka-aineista muodostetaan puhdasta energiaa. Biohajoava raaka-aine käsitellään laitoksissa, jonka jälkeen syntynyt energia varastoidaan ja ravinteet palautetaan takaisin luonnon kiertokulkuun. (Biokaasu 6.11.2010.)

Biokaasuksi kutsutaan hapettomassa mikrobiologisessa prosessissa syntyvää tuotekaasua, joka sisältää pääasiassa metaania, hiilidioksidia ja pieninä määrinä (alle kaksi prosenttia) esimerkiksi happea ja typpeä sekä kosteutta, orgaanisia piiyhdisteitä ja partikkeleita (Biokaasun tuotanto suomalaisessa toimintaympäristössä: 40, 59). Metaania voidaan hyödyntää mm. sähkön- ja lämmöntuotannossa, teollisuusprosesseissa sekä ajoneuvojen ja työkoneiden polttoaineena, mutta jalostamattomana biokaasua ei voida syöttää maakaasuverkkoon. Jalostettua biokaasua voidaan syöttää maakaasuverkkoon sekä hyödyntää useissa kohteissa maakaasun tavoin, esimerkiksi autojen polttoaineena. Biometaani on monissa elinkaarianalyseissa mainittu yhdeksi ekologisimmista ja energiatehokkaimmista polttoaineista. (Tietoa biokaasusta 10.9.2010.) Metaani on kuitenkin merkittävä kasvihuoneilmiötä kiihdyttävä kaasu, joten sen käsittelyssä ja varastoinnissa on huomioitava tarkkaan kaasun ilmaan purkautumisen ehkäiseminen. Metaanin kasvihuonekaasuvaikutus 100 vuoden tarkastelujaksolla on 25-kertainen hiilidioksidiin verrattuna (Siitonen 17.11.2010).

Maakaasu on fossiilinen polttoaine, eli sen poltosta syntyvä hiilidioksidi aiheuttaa ilmaston lämpenemistä. Biokaasu taas on uusiutuva polttoaine, sillä suurin osa sen raaka-aineista on tuotettu tai syntynyt yhden tai korkeintaan muutaman edellisen

kasvukauden aikana, ja kaikkien päästöjen tase on tällä aikavälillä nolla tai jopa negatiivinen. Jalostettu bio- ja maakaasu ovat kummatkin lähes kokonaan metaania, mutta johtuen niissä metaanin lisäksi olevista muista komponenteista, jalostetun biokaasun energiasisältö on hieman pienempi kuin jalostetun maakaasun. (Biokaasun koostumus 2.9.2010.)

4.1 Kaasun käyttö Suomessa

Maakaasu tulee Suomeen Venäjältä. Suomen maakaasuverkosto ulottuu Kaakkois-Suomesta pääkaupunkiseudulle, Pirkanmaalle ja osaan läntistä Uuttamaata. Maakaasun osuus Suomen primäärienergian kulutuksesta on noin kymmenen prosenttia. Maakaasun kokonaiskulutuksesta teollisuuden osuus on alle 50 % ja kaukolämmitys ja siihen liittyvä sähköntuotanto yli 50 %. (Maakaasun käyttö Suomessa 1.9.2010.)

Maakaasua myydään paikallisen jakeluverkon kautta pienempiin käyttökohteisiin yli 30 paikkakunnalla. Alueella toimiva energiayhtiö tai erillinen maakaasun paikallisjakeluyhtiö vastaa maakaasun vähittäismyynnistä ja paikallisjakelusta. Asiakkaita ovat esimerkiksi pienet teollisuuslaitokset, julkiset palvelu- ja liikekiinteistöt, rivi- ja kerrostaloyhtiöt ja pientalot. Maakaasun vähittäismyyjien osuus koko maakaasun myyntivolyymista on noin viisi prosenttia, sillä suurin osa kaasusta menee suurkanäyttäjille. Suoraan maakaasua lämmitykseen käyttäviä asuintaloja Suomessa on hyvin vähän, sillä kaukolämpöä käytetään enemmän. Suomen maakaasuverkkoon on liittynyt kuitenkin yli 2 500 pientaloa ja yli 600 suurempaa asuinrakennusta. (Maakaasun käyttö Suomessa 1.9.2010.)

4.2 Hinnoittelu

Maakaasun hinnoittelu muodostuu sekä itse energian että kaasun siirron hinnoittelusta. Hinnoitteluun vaikuttaa myös se, onko asiakas yhteydessä korkeapaineiseen siirtoputkeen, jolloin hinnoittelu on tukkuhinnoittelua, vai matalapaineiseen jakeluputkeen, jolloin hinnoittelu menee jakelu- ja vähittäishinnoittelun mukaan. Kaasu, joka myydään maakaasuautojen polttoaineeksi, hinnoitellaan kiloina. Tällöin hinnoittelu on asemakohtaista. (Maakaasun hinnoittelu 7.9.2010.)

Kaasun myynnin tulee perustua julkiseen tarffiin, jonka perusteella hinta voi riippua vain myynnin määrästä ja sen ajoittumisesta. Sopimuksissa erotellaan kaasun siirron ja itse kaasun hinta omiksi kokonaisuuksikseen. Asiakas voi kulutusrakenteensa perusteella päättää, mikä on kaasun kuukausittainen tilausteho. Siirto- ja kaasutariffit koostuvat muun muassa maksimitehoon ja toimitettuun energiamäärään perustuvista komponenteista, joista kokonaismäärä on yleensä suurin. Myös tehoperusteinen osuus on merkittävä, sillä kaasun toimituskustannuksista suurimman osan muodostavat investoinnit kaasuverkkoon niin Suomessa kuin Suomen ulkopuolella. Investoinnit Suomessa maksetaan osittain siirron tehomaksussa ja investoinnit Suomen ulkopuolella kaasun tehomaksussa, johtuen siitä, että siirtomaksu vastaa vain Suomen alueella tapahtuvaa siirtoa. (VTT Prosessit 2004: 179.)

4.3 Turvallisuus

Kaasun siirron ja prosessoinnin suhteen merkittävimmät turvallisuuteen vaikuttavat tekijät ovat toimiva ja luotettava siirto- ja jakelujärjestelmä, käyttöturvalliset laitteet sekä osaava henkilökunta, jota koulutetaan jatkuvasti. Näitä tekijöitä ohjataan alan tekniikkaa ja turvallisuutta käsittävällä lainsäädännöllä. Kaasuputkiston ja -laitteiden standardisointi on erittäin yleistä erityisesti Euroopan mittakaavassa. Kaasualan työt vaativat yleensä erillisen luvan ja henkilöille, jotka tehtävää hoitavat, on asetettu pätevyysvaatimus. On erittäin tärkeää tiedottaa putkiston läheisyydessä työskenteleviä henkilöitä maakaasusta ja siihen liittyvistä tekijöistä. Suomessa maakaasu ei ole aiheuttanut yhtään kuolemaan johtanutta onnettomuutta, yleisin Suomessa sattunut vahinko on kaivinkoneen aiheuttama jakeluputkiston katkaisu. (Yleistä maakaasun turvallisuudesta 7.9.2010.)

5 MAAKAASUN JA BIOKAASUN KULJETUSMUODOT

Maa- ja biokaasua voidaan kuljettaa putkessa, maanteitse, vesiteitse ja rautateitse. Vesietukuljetukset tapahtuvat erityisrakenteisilla aluksilla. Rautateillä nesteitä ja kaasuja kuljetetaan säiliövaunuissa. Norjassa myös nestemäisen maakaasun eli LNG:n (Liquefied Natural Gas) maantiekuljetukset ovat tavallisia. Gasum on viime vuosien aikana aloittanut säännölliset nesteytetyn maakaasun maantiekuljetukset Suomessa.

Tämä mahdollistaa kaasun käytön myös muualla kuin putkiverkoston läheisyydessä, esimerkiksi liikenteen polttoaineena. (Riikonen: 4.)

5.1 Maantiekuljetukset

Säiliöautokuljetukset ovat maantiekuljetuksista merkittävä oma ryhmänsä, jota koskevat tarkat säädökset. Säiliöautokuljetuksista puhuttaessa tarkoitetaan pääsääntöisesti kaasu- ja nestemäisten öljy- ja kemikaalituotteiden kuljetuksia suursäiliöissä. Useimmat säiliökuljetukset luokitellaan vaarallisten aineiden kuljetuksiksi, eli ne ovat kotimaisten ns.VAK-säädösten tai kansainvälisten ADR (L'Accord Européen Relatif au Transport International des Marchandises Dangereuses par Route) -säädösten alaisia. Kaikki liuottavat, palavat, räjähtävät, syövyttävät, emäksiset, itsestään syttyvät, myrkylliset, säteilevät tai muutoin haitalliset aineet luokitellaan vaarallisiksi aineiksi ja niitä saadaan kuljettaa vain tätä tarkoitusta varten varustelluilla ajoneuvoilla, joiden kuljettajilla tulee olla asianmukainen, tällaisen ajoneuvon kuljettamiseen oikeuttava ajolupa. Suomi liittyi ADR-sopimukseen vuonna 1979. (Karhunen et al. 2008: 73.)

Gasumin omistuksessa on kaksi säiliöperävaunua, ja se ostaa kuljetuspalvelut kemikaali- ja polttonestekuljetuksiin erikoistuneelta Kiitosimeonilta. Säiliöiden vetoautot ja niiden kuljettajat ovat Kiitosimeonin, minkä johdosta Gasum voi keskittyä ydinosaamiseensa, eikä yrityksellä tarvitse olla palveluksessaan kuljetusalan henkilöstöä tai -osaamista. Kiitosimeon vastaa myös Gasumin kuljetuskaluston ylläpidosta. (Nuppunen 17.6.2010.) Säiliöperävaunu, johon noin -160°C nestemäinen kaasu pakataan, on tilavuudeltaan 56 m^3 ja pituudeltaan 14 m. (Nesteytetty maakaasu 1.11.2010.)

Nestemäistä maakaasua (LNG) kuljetetaan monissa maissa maanteitse jo niin suuressa määrin, että tätä kuljetusmuotoa pidetään jo tarkoituksenmukaisempana kuin pitkien putkilinjojen rakentamista taajamien halki. LNG-kuljetussäiliön kapasiteettia rajoittavat tieliikenteelle määritetyt maksimileveydet ja -pituudet. Säiliön lastaus sekä purku vievät aikaa normaalisti hieman yli tunnin. Kaasumäärän mittaus suoritetaan joko nestefaasin virtausmittarilla tai punnitsemalla auto ennen ja jälkeen lastin purun. (Riikonen: 8-9.)

5.2 Rautatiekuljetukset

Maa- ja biokaasua kuljetetaan rautateitse säiliöissä. Rautateitse kuljetetaan paljon raskaan teollisuuden kuljetuksia. Rautatieliikenne koostuu rataverkoista ja siinä olevista solmuista eli asemista. Maantiekuljetusten joustavuus ja läpäisyajat ovat rautatiekuljetuksia paremmat, mikä johtuu rautateiden rakenteesta. Tavaroiden kuormaus- ja purkupaikat sijoitetaan siten, etteivät ne aiheuta häiriötä muulle liikenteelle. Rautatiekuljetus vaatii aina maantiekuljetuksen alku- ja loppupäähän, ellei rautatie ulotu asiakkaan kiinteistölle asti, mikä puolestaan nostaa kuljetusprosessin kustannuksia ja pidentää läpäisyaikaa. (Hokkanen et al. 2004: 116.)

5.3 Vesitiekuljetukset

Maa- ja biokaasua voidaan kuljettaa vesiteitse erityisesti tarkoitukseen suunnitelluilla tankkialuksilla. Tankkialukset kuljettavat lastinsa tankeissa, juoksevassa olomuodossa olevien lastien käsittely tapahtuu lastiputkistojen avulla. Tankkialukset voidaan jakaa kuljetettavien tuotteiden olomuodon mukaan nestemäisiä tuotteita kuljettaviin aluksiin ja kaasusäiliöaluksiin. (Karhunen et al. 2008: 200.)

Vesitiliikenne jaetaan kolmeen osa-alueeseen, sisävesi-, rannikko- ja meriliikenteeseen. Yhteistä näille liikennemuodoille on rajoitettu saatavuus, sillä vesiliikenne on tarvitsee asemapaikan eli sataman. Tällöin vesiliikenteen alku- ja loppukuljetusosuus vaatii jonkin muun kuljetusmuodon, esimerkiksi maantiekuljetuksen. Vesitiekuljetukset toimivat parhaiten bulk-tavaroiden, kuten malmin, nesteiden ym. kuljetuksessa. (Hokkanen et al. 2004: 122,124.)

5.4 Putkikuljetukset

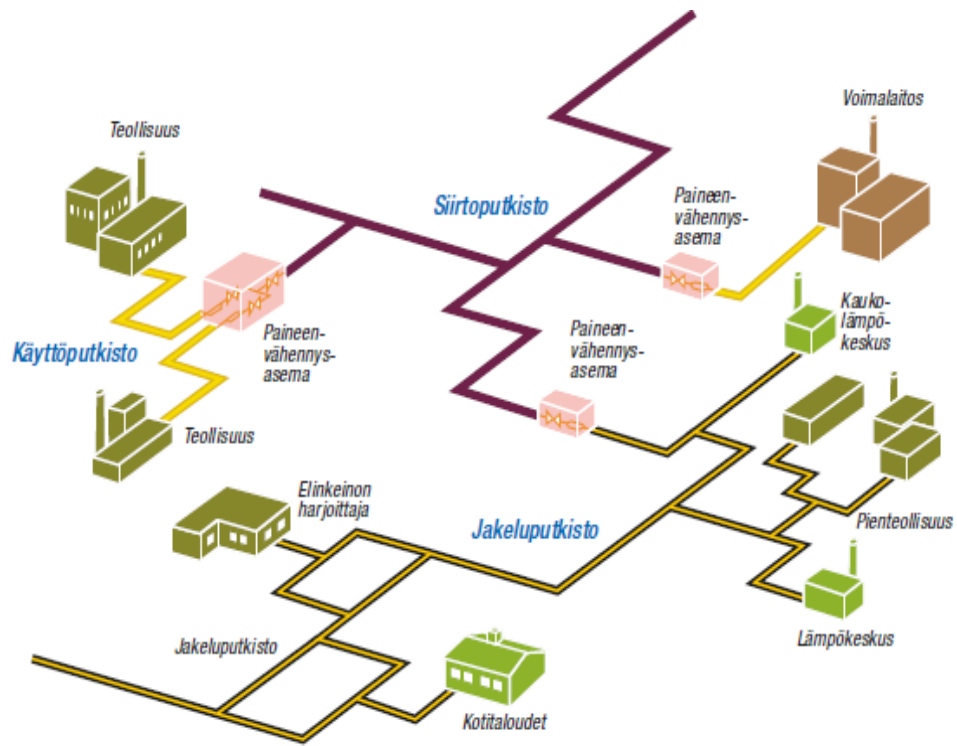
Suomessa putkikuljetus ei toimi kaukokuljetusmuotona, vaan se on usein kemianteollisuuden sisäinen tai kahden vierekkäin sijaitsevan laitoksen välinen kuljetus, jonka merkitys on paikallisella tasolla. Putkikuljetuksilla on kuitenkin merkittävä asema fossiilisten energialähteiden tuottajamaissa, sillä öljy- ja kaasuesiintymät sijaitsevat yleensä vaikeakulkuisilla paikoilla, kuten aavikoilla, tundralla ja viidakossa. Tällöin ainut kustannuksiltaan kohtuullinen kuljetusmuoto jalostamolle tai satamiin on putkikuljetus. (Hokkanen et al. 2004: 132.)

Maakaasun toimitukset ovat valtaosiltaan sidotut siirto-putkistoon, jonka rakentamiseen on sitoutunut paljon pääomaa. Putkikuljetukselle vaihtoehtona oleva nesteytetyn maakaasun kuljetus edellyttää myös suuria investointeja kalustoon ja kuljetuksen lähtö- ja vastaanottopäässä tarvittaviin laitteistoihin ja säiliöihin nesteytetyn kaasun käsittelyä ja varastointia varten. (VTT Prosessit 2004: 111.)

Energia Suomessa –teoksen (2004) kirjoittajien mukaan investointikustannusten, nesteytysprosessin synnyttämien energiahäviöiden ja muiden käyttökustannusten vuoksi nesteytetty kaasu ei globaalissa mittakaavassa pysty kilpailemaan putkiston kautta tapahtuvien toimitusten kanssa, joiden hinnat määräytyvät kahdenkeskisten sopimusten pohjalta. Näissä sopimuksissa kaasun hinta sidotaan markkinoilla määräytyviin vertailuhintaindekseihin, joiden yksityiskohdat ovat riippuvaisia ostajalle ja myyjälle tarjolla olevista kilpailevista vaihtoehdoista. (VTT Prosessit 2004: 111.) Viime aikoina nesteytetyn kaasun kilpailukyky on kuitenkin parantunut huomattavasti (Suomilampi 17.11.2010).

5.5 Case-tarkastelu: Biokaasun kuljetus maakaasuverkostoon

Maakaasun siirtojärjestelmän muodostavat siirto- ja jakeluverkostot, joita on havainnollistettu kuvassa 2 sivulla 35. Suomen maakaasuverkoston kokonaispituus on noin 3 000 kilometriä, josta siirto-putkiston pituus on 1 187 kilometriä ja jakelu-putkiston 1 805 kilometriä, josta Gasumin osuus on 500 kilometriä. Siirtoverkosto on kokonaan Gasumin omistuksessa oleva korkeapaineinen putkisto, jolla maakaasu siirretään käyttöalueille. (Kaasuverkosto 7.9.2010.)



Kuva 2. Maakaasuputkistojen jaottelu (Suomen kaasuyhdistys, maakaasukäsikirja 20.11.2010)

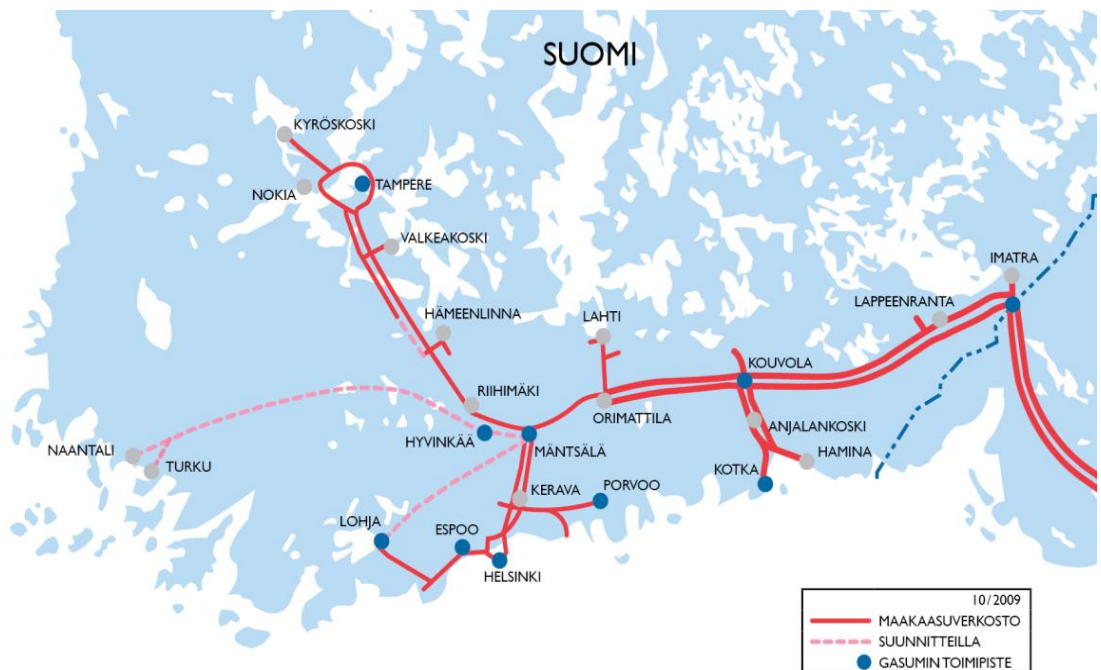
Korkeapaineisen maakaasun siirtojärjestelmän keskeisimmät osat ovat siirtoputkisto, venttiiliasemat, kompressoriasemat, valvonta-asemat, paineenvähennys- ja mittausasemat, katodinen suojaus ja tiedonsiirto. Siirtoputkistosta maakaasu johdetaan paineenvähennysasemille, josta se välitetään alennetussa paineessa eteenpäin joko suoraan käyttäjille teollisuuslaitoksiin ja voimalaitoksille tai taajamien paikallisjakeluverkostoihin jakeluyhtiöille. Paineenvähennysasemilla myös mitataan kuluttajille siirrettävän kaasun määrä. (Skaffari 1999: 44.)

Maakaasuputken reitille rakennetaan venttiiliasemia 6-30 kilometrin välein. Niiden avulla voidaan tarvittaessa katkaista kaasun siirto ja jakelu ja tyhjentää putki maakaasusta ulospuhaltamalla. Verkostolla on oma tiedonsiirtojärjestelmä, jonka avulla valvonta- ja hälytystietoja voidaan ilmoittaa valvontakeskukseen. (Skaffari 1999: 44.)

Maakaasuverkostoa kehitetään jatkuvasti. Kehittämistyössä on huomioitu biokaasun mahdollisuus uutena energiakaasuna. Gasumin selvitysten mukaan biomassasta tuotettu biokaasu pystytään jalostusprosessin jälkeen siirtämään siirtoverkkoon.

Biokaasun vastaanottaminen kaasuverkkoon vaatii tarkkaa biokaasun koostumuksen ja laadun valvontaa. Gasumin tavoitteena on, että puhdistettua biokaasua voidaan syöttää verkkoon vuoden 2011 aikana. (Gasum vuosikertomus 2009: 11.)

Euroopan unionin aluetta koskevan direktiivin mukaisesti maakaasun siirtoverkkoa tulee mahdollisuuksien mukaan tarjota kaikkien siirtoa kaipaavien, verkon vaatimukset täyttävien toimitusten käyttöön. Maakaasun ostaja ei täten ole sidottu paikallisen siirtoverkon haltijaan, vaan hän voi käydä kauppaa myös muiden myyjien kanssa. Tämä määräys ei koske tällä hetkellä Suomea, sillä Suomen kaasuverkko on yhteydessä ainoastaan Venäjälle. Kaasuverkon haltija on kuitenkin Suomessakin velvollinen sallimaan kaasun jälkimarkkinat, joilla kaasua yli oman tarpeensa varannut ostaja myy ylijäämän toiselle ostajalle. Suomessa kaasukauppa on Energiamarkkinaviraston valvonnassa johtuen siirtoliiketoiminnan sääntelystä. (VTT Prosessit: 179.)



Kuva 3. Maakaasuverkosto, verkon laajennussuunnitelmat ja Gasum Oy:n toimipisteet (Maakaasuverkosto 7.9.2010)

Biokaasun syöttö maakaasuverkkoon voi tapahtua joko biokaasun tuotantolaitoksen läheisyydessä suoraan siirtoputkeen, putken haaraan tai kuljettamalla nesteytetty biokaasu laitokselta keskitetyn syötön pisteeseen. Keskitetyn syötön piste sijoitetaan

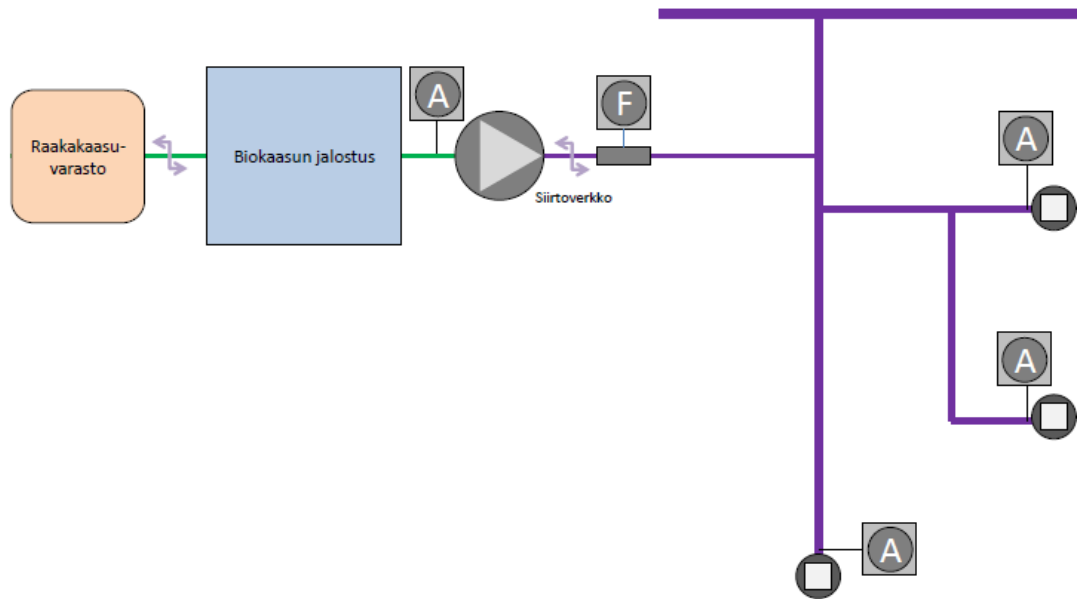
kohtaan, jonka ohi virtaa suuri määrä maakaasua, jolloin biokaasu sekoittuu maakaasuun ja syntyy niin kutsuttua seoskaasua. (Nuppunen 17.6.2010.)

Biokaasun keskitetty verkkoon syöttö edellyttää, että kaasu jalostetaan esimerkiksi kryogeenisellä eli kylmäteknisellä prosessilla. Kryotekniikassa biokaasua jäähdytetään monessa vaiheessa. Ensimmäisissä vaiheissa biokaasusta poistuvat epäpuhtaudet ja hiilidioksidi johtuen niiden alemmista kiehumislämpötiloista. Jäljelle jää jalostettu biokaasu, joka voidaan ottaa prosessista ulos kaasumaisena tai jäähdyttää sitä vielä lisää, jolloin se saadaan ulos nestemäisenä. Prosessista muodostuu sivutuotteena puhdasta, nestemäistä hiilidioksidia, jota esimerkiksi pystytään myymään eteenpäin. (MOBE – Biokaasukonseptin kehittäminen, tekninen esiselvitys: 9.) Eri tuotantolaitoksilla tuotettu nesteytetty biokaasu kuljetetaan autolla keskitetyn syötön laitokselle, jossa nesteytetty biokaasu pumpataan varastosäiliöstä korkeapainehöyrytimeen ja höyrystynyt biokaasu johdetaan edelleen maakaasuverkostoon (Nuppunen 17.6.2010).

5.5.1 Jalostetun biokaasun suora putkisiirto maakaasun siirtoverkkoon

Jalostetun biokaasun suora syöttö tapahtuu biokaasun tuotantolaitokselta rakennettavaa syöttöputkea pitkin maakaasun siirto- tai jakeluverkkoon. Siirtoverkkoon syötettäessä tarvitaan syöttöputken ja liittynän lisäksi kaasun paineen nostava kompressori. (Nuppunen 17.6.2010.)

Suoran syötön tapauksessa seoskaasun laadunhallinta ja asiakaskohtaiset kaasun lämpöarvot aiheuttavat monimutkaisuutta siirron ja myynnin järjestelmiin. Seoskaasun lämpöarvon analysointi on välttämätöntä maakaasuverkon solmu- ja haarapisteissä. (Nuppunen 17.6.2010.) Maakaasuverkkoon syötettävän biokaasun laatuvaatimuksista merkittävimmät ovat sen riittävän korkea (suurempi kuin 95 %) metaanipitoisuus sekä tärkeimpien epäpuhtauskomponenttien eli rikkiyhdisteiden ja hapen riittävän alhainen määrä. Nämä vaatimukset määrittävät sovellettavan puhdistusmenetelmän. (Järjestelmä vastaavan asettamat ehdot järjestelmä vastuun toteuttamiseksi 2009: 5.)



Kuva 4. Jalostetun biokaasun suora putkisiirto maakaasun siirtoverkoston (MOBE-raportti)

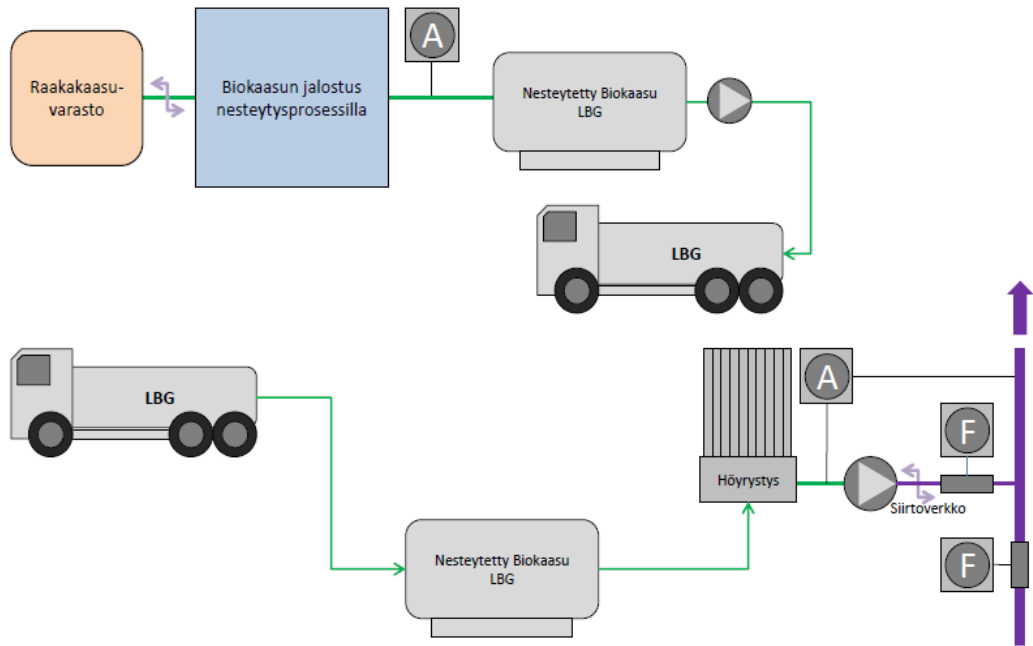
Kuvassa 4 on prosessikaavio jalostetun biokaasun paikallissyötöstä maakaasun siirtoverkoston. Kuvassa A on analysaattori, kromatografi ja F on virtausmittari, määrämittaus. Jalostetun biokaasun laatu mitataan ennen komprimointia, määrämittaus on komprimoinnin jälkeen. Verkoston haarakohdissa biokaasun laatu mitataan paineenvähennysasemien yhteydessä.

5.5.2 Nesteytetyn biokaasun keskitetty syöttö maakaasuverkostoon

Biokaasun keskitetyn syötön tapauksessa eri tuotantolaitoksilla tuotettu nesteytetty biokaasu kuljetetaan autokuljetuksina runkoverkon välittömässä läheisyydessä olevaan varastosäiliöön. Sieltä nestemäinen kaasu syötetään korkeapainehöyrystimeen, josta se siirretään kaasumaisena runkoverkkoon. Nesteytetyn kaasun kuljetus voidaan hoitaa joko säiliöautoilla tai vaihdettavilla konttisäiliöillä. Konttisäiliöitä voidaan hyödyntää myös varastosäiliöinä. (Nuppunen 17.6.2010.)

Verkkoon syötettävän biokaasun määrä voidaan mitata joko nestemäisenä tai kaasuna. Seoskaasun laatu mitataan syöttöpisteen jälkeen olevalla kromatografilla, joita

keskitetyn syötön tapauksessa tarvitaan vain yksi. Kaikilla syöttöpisteen jälkeisillä asiakkailla kaasulla on sama lämpöarvo ja päästökerroin. Jos seoskaasun lämpöarvo halutaan palauttaa maakaasun lämpöarvoa vastaavaksi, on biokaasun joukkoon syötettävä propaania. Keskitetyn syötön tapauksessa myös propaanin syöttölaitoksia tarvitaan vain yksi. Keskitetyn syötön prosessikaavio on kuvassa 5. (Nuppunen 17.6.2010.)



Kuva 5. Nesteytetyn biokaasun keskitetty syöttö maakaasun siirtoverkkoon (MOBE-raportti)

6 BIOKAASUN KULJETUSVAIHTOEHTOJEN KUSTANNUKSET, ENERGIATEHOKKUUS JA HIILIJALANJÄLKI

Tässä luvussa käsitellään biokaasun kuljetusvaihtoehtojen kustannuksia, energiatehokkuutta ja hiilijalanjälkeä. Kustannusten todettiin jo tutkimuskysymyksen asettamisen vaiheessa olevan implisiittinen tekijä, jota ei teoriaosuudessa tarkasteltu. Teoriaosuudessa kestävä kehityksen käsitteen kautta päädytään energiatehokkuuden tarkastelussa käyttämään suoraan käytetyn energian määrää siirrettyä biokaasuyksikköä kohden. Ympäristövaikutusten vertailutekijäksi valitaan hiilijalanjälki, jolloin tarkastellaan syntyvää hiilidioksidimäärää siirrettyä

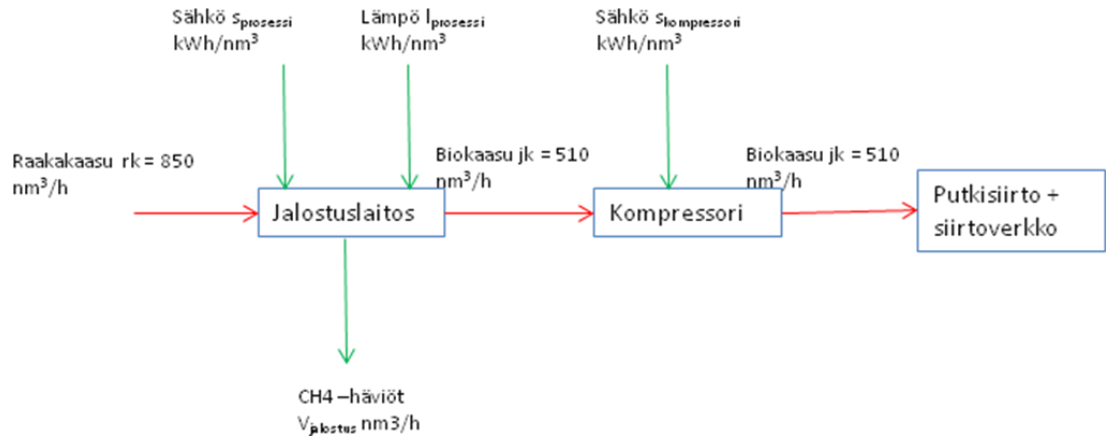
biokaasuyksikköä kohden. Kunkin vertailutekijän kohdalla siirrettävää kuljetusmatkaa käytetään muuttujana, jotta saadaan selville se kuljetusetäisyys, jossa toisen kuljetusmuodon paremmuus kunkin kriteerin kohdalla muuttuu. Luvun toisessa osassa tarkastellaan kunkin vertailukriteerin laskennan tuloksia ja niistä tehtäviä johtopäätöksiä.

Kustannukset ja energiankulutukset on laskettu toimeksiantajalta saatujen, Nastolan biokaasulaitoksen suunnittelutyöhön pohjautuvien arvojen perusteella. Joidenkin arvojen kohdalla on jouduttu käyttämään oletuksia, esimerkiksi jalostuslaitoksen ja keskitetyn syöttöpisteen vuosittaisten käyttökustannusten osalta (tietty prosentuaalinen osuus investointikustannuksesta). Luvun alussa esitetään kolmen eri vertailukriteerin laskenta, joiden perusteella laaditut Excel-laskentataulukot ovat työn liitteinä. Tutkimuksen julkisesta versiosta on poistettu luottamukselliset tiedot, joten kaikkia yksityiskohtia siinä ei voida näyttää.

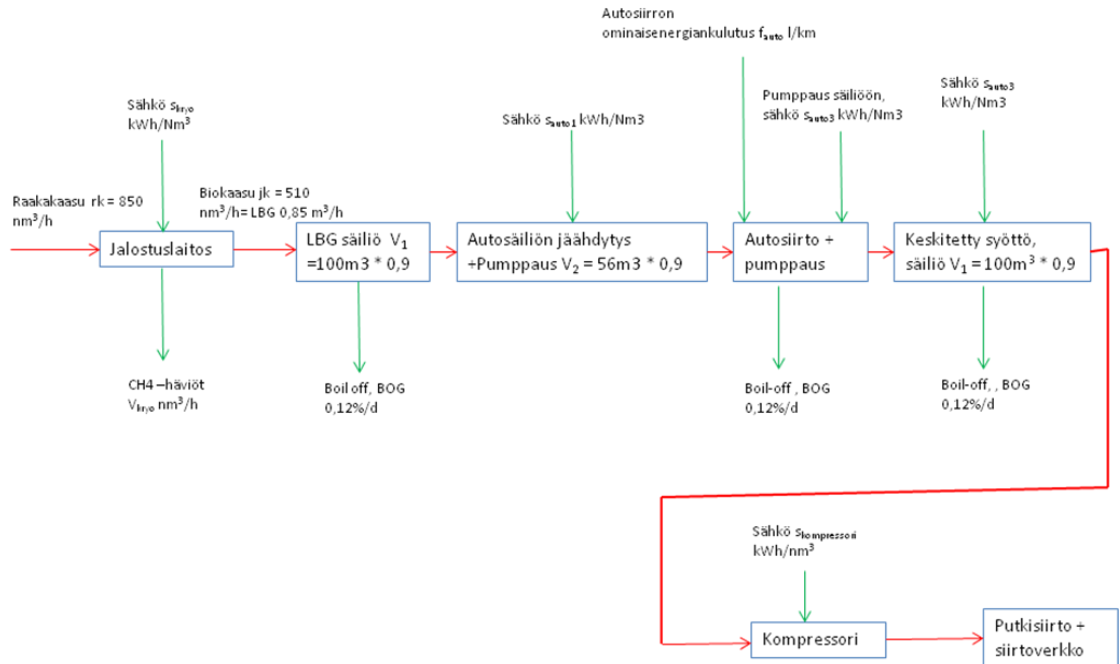
Putkisiirron osalta putken rakentamisen aiheuttama hiilijalanjälki on jätetty tämän työn aiherajauksen ulkopuolelle. Tässä työssä ei ole myöskään käsitelty esimerkiksi työmaan vaatimien teiden rakentamisen kustannuksia tai työkoneiden aiheuttamia päästöjä. Molempien vaihtoehtojen vertailuissa on käytetty yksikkönä kaasumaista kuutiota.

6.1 Biokaasun kuljetusvaihtoehtojen kustannusten, energiatehokkuuden ja hiilijalanjäljen laskeminen

Tässä työssä tehdyt laskennat on mallinnettu Excel-laskentataulukoon, jossa lähtöarvoja muuttamalla voidaan tarkastella tuloksen herkkyyttä eri lähtötieto-oletuksiin. Näitä voivat olla mm. kohteen investointi- ja käyttökustannukset, pitoaika ja investoinnille vaadittava korko. Laskennassa on käytetty vuoden 2010 valmisteveron mukaisia energian hintoja ilman arvonnalisäveroa. Seuraavaksi tarkasteltavissa laskennoissa käytetään kuvissa 6 ja 7 esitettyjä lähtötietoja.



Kuva 6. Putkisiirron laskentojen lähtötiedot



Kuva 7. Nesteytetyn siirron laskennan lähtötiedot

Laskelmissa ei esitetä selityksiä kaikkien laskentojen yhteisille tekijöille, joita ovat seuraavat:

n	= korkojaksojen lukumäärä	= 15 vuotta
i	= korkokanta	= 8 %
h	= käyttöaste	= 8000 h/a

r_k	= raakakaasun virtausmäärä	= 850 nm ³ /h
j_k	= jalostetun biokaasun virtausmäärä	= 510 nm ³ /h
s_{hinta}	= sähkön kokonaishinta	= 70 €/MWh
$m_{k_{\text{hinta}}}$	= maakaasun kokonaishinta	= 30 €/MWh

6.1.1 Putkisiirron ominaiskustannus

Putkisiirron ominaiskustannuksilla tarkoitetaan euromääräistä kustannusta siirrettyä jalostettua biokaasukuutiota kohti ja sen laskenta on esitetty seuraavassa.

Putkisiirron ominaiskustannukset muodostuvat pääomakustannuksista ja käyttökuluista. Pääomakustannusten vaikutus voidaan laskea kaavalla (1) laskemalla sijoitetun pääoman annuiteetti k . Toimeksiantajan antamien lähtötietojen mukaan biokaasulaitoksen teknistaloudellisena pitoaikana voidaan pitää 15 vuotta ja korkokantana 8 %.

$$k = \text{sijoitetun pääoman annuiteetti} = c_{n|i} K_0 \quad [€/a] \quad (1)$$

missä

$$c_{n|i} = \text{kuoletuskerroin} = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (2)$$

ja

$$K_0 = \text{pääoma} = (\text{luottamuksellinen tieto})$$

Putkisiirtotapauksessa investoitu pääoma K_0 muodostuu seuraavasti:

$$K_0 = k_{\text{putki/km}} * d + k_{\text{kromatografi}} + k_{\text{upgreidaus}} + k_{\text{laitos}} + k_{\text{kompressori}} \quad [€] \quad (3)$$

missä

$$d = \text{putkisiirron matka}$$

$$k_{\text{putki/km}} = \text{putken investointikustannus per km}$$

$$k_{\text{kromatografi}} = \text{verkkoon asennettävien kromatografioiden investointikustannus (luottamuksellinen tieto)}$$

$$k_{\text{upgreidaus}} = \text{biokaasun jalostuslaitoksen prosessin investointikustannus (luottamuksellinen tieto)}$$

k_{laitos} = biokaasun jalostuslaitoksen oheislaitteiden investointikustannus (luottamuksellinen tieto)

$k_{\text{kompessorori}}$ = kompressorin investointikustannus (luottamuksellinen tieto)

Putkisiirron käyttökustannukset kk_{putki} lasketaan seuraavasti:

$$kk_{\text{putki}} = K_1 + K_2 + K_3 + K_4 + K_5 \quad [€/a] \quad (4)$$

missä

K_1 = biokaasun jalostuslaitoksen käyttökustannukset (luottamuksellinen tieto)

K_2 = biokaasun jalostuslaitoksen sähkökustannus, joka on

$$K_2 = h * rk * s_{\text{prosessi}} * s_{\text{hinta}} \quad [€/a] \quad (5)$$

jossa

s_{prosessi} = jalostusprosessin sähkön kulutus raakakaasukuutiota kohden (luottamuksellinen tieto) [kWh/ nm³]

K_3 = biokaasun jalostuslaitoksen lämpökustannus, joka on

$$K_3 = h * rk * l_{\text{prosessi}} * l_{\text{hinta}} \quad [€/a] \quad (6)$$

jossa

$$h = \text{käyttöaste} = 8000 \text{ h/a}$$

l_{prosessi} = jalostusprosessin lämmön kulutus raakakaasukuutiota kohden (luottamuksellinen tieto) [kWh/ nm³]

l_{hinta} = lämmön kokonaishinta, joka on

$$l_{\text{hinta}} = \eta * mk \quad [€/MWh] \quad (7)$$

jossa

$$\eta = \text{lämmityskattilan hyötysuhde} = 92 \%$$

K_4 = biokaasun kompressorin sähkökustannus, joka on

$$K_4 = h * jk * s_{\text{kompessorori}} * s_{\text{hinta}} \quad [€/a] \quad (8)$$

jossa

$s_{\text{kompessorori}}$ = kompressorin sähkön kulutus jalostettua biokaasukuutiota kohden [kWh/ nm³] (luottamuksellinen tieto)

K_5 = kompressorin käyttökustannus

jonka oletetaan olevan 5 % kompressorin investointikustannuksista eli

$$K_5 = k_{\text{kompessorori}} * 5\% \quad [€/a] \quad (9)$$

Putkisiirron vuosittainen kustannus siis muodostuu pääoma- ja käyttökuluista ja on vuodessa:

$$K_{\text{putki}} = k + k k_{\text{putki}} \quad [€/a] \quad (10)$$

Tästä voidaan laskea putkisiirron ominaiskustannus seuraavasti:

$$OK_{\text{putki}} = \frac{K_{\text{putki}}}{h * j k} \quad [€/nm^3] \quad (11)$$

Putkisiirron ominaiskustannus vaihtelee OK_{putki} investoidun pääoman $K_{0\text{putki}}$ mukaan, joka muuttuu tarvittavan putken pituuden d mukaan. Varioimalla siirtomatkaa d lasketaan biokaasun putkisiirron ominaiskustannus. Koska putken investointikustannus $k_{\text{putki}/\text{km}}$ vaihtelee kerralla rakennettavan putken pituuden mukaan ja investoinnin yksikköhinta haarakka €/km voidaan ilman suunnittelua vain arvioida, lasketaan biokaasun siirron ominaiskustannus neljällä eri yksikköhinnalla eli 500 000 €/km ja 600 000 €/km alle 10 km:n pituisilla matkoilla sekä 350 000 €/km ja 450 000 €/km yli 10 km:n pituisilla matkoilla. Varioimalla putken pituutta d sekä investointikustannuksia $k_{\text{putki}/\text{km}}$ saadaan kuvassa 8 esitetty kuvaaja biokaasun putkisiirron ominaiskustannuksista OK_{putki} .

6.1.2 Johtopäätöksiä putkisiirron kustannuslaskennasta

Kustannuslaskennassa kappaleessa 6.1.1 käytetyn pitoajan ja korkokannan herkkyyttä on syytä tarkastella mallinnetun laskentataulukon avulla, sillä on epätodennäköistä, että putkisiirrossa investoitavan putkiosuuden pitoaika olisi vain laskennassa käytetty 15 vuotta. Normaalisti maakaasuputkiston pitoaika on useita kymmeniä vuosia, esimerkiksi Energiamarckinaviraston julkaiseman yksikköhintaselvityksen mukaan maakaasun siirron hinnoittelun kohtuullisuudesta maakaasuputken pitoajaksi on määritelty 45 vuotta (Maakaasuverkkokomponentit 5.1.2011). Lisäksi putkisiirrossa voidaan usean laitoksen tapauksessa saavuttaa mittakaavaetuja maakaasuverkkoon asennettavien kromatografien määrässä, jolloin niiden investointikustannus jakautuu useammalle biokaasulaitokselle.

Kustannuslaskennassa yksi merkittävimmistä tekijöistä on kompressorin sähkökustannus, joka riippuu tarvittavasta biokaasun paineen nostosta. Tarvittavan loppupaineen on arvioitu olevan 40 bar, jonka toimeksiantaja on ilmoittanut olevan

syötettävän pisteen vallitseva keskimääräinen paine. Biokaasun jalostuslaitoksen paine on 4 bar, joten tarvittava paineennosto on näiden erotus. Toimeksiantaja on laskenut paineen nostoon tarvittavan energian termodynamiikkalaskelmilla. Tarvittavan purkupaineen tulee olla riittävän korkea, jotta se kattaa myös syöttöputkessa tapahtuvan painehäviön. Painehäviöksi toimeksiantaja on laskenut DN100-kaasuputkessa olevan tarkastelussa käytetyillä kaasumäärillä 150 km:n matkalla olevan noin 0,4 bar. Tämän suuruisen painehäviön vaikutus kompressorin energiakulutukseen ja kustannuksiin on marginaalinen, joten voidaan todeta, että tehty kustannustarkastelu on riittävän tarkka ainakin 100 km:n matkalle asti. Tilanne muuttuu kuitenkin silloin, jos biokaasun määrä suhteessa putkikokoon kasvaa olennaisesti. Siinä tapauksessa voidaan mallinnetussa laskentataulukossa nostaa kompressorin tarvitsemaa energiamäärää pumpattavaa biokaasukuutiota kohti vastaamaan painehäviön verran suurempaa lähtöpainetta ja siten analysoida kustannusvaikutusta.

6.1.3 Nesteytetyn siirron ominaiskustannus

Nesteytetyn siirron ominaiskustannuksilla tarkoitetaan euromääräistä kustannusta siirrettyä jalostettua biokaasukuutiota kohti ja sen laskenta on esitetty seuraavassa.

Nesteytetyn siirron ominaiskustannukset muodostuvat vastaavalla tavalla kuin putkisiirrossa pääomakustannuksista ja käyttökuluista. Pääomakustannusten vaikutus voidaan laskea edellä esitetyllä kaavalla (1) laskemalla sijoitetun pääoman annuiteetti k .

Nesteytetyn siirron tapauksessa investoitu pääoma K_0 muodostuu seuraavasti:

$$K_0 = k_{\text{kryo}} + k_{\text{kryokromatografi}} + k_{\text{syöttö}} + k_{\text{kryolaitos}} + k_{\text{kompressori}} \quad [€] \quad (12)$$

missä

k_{kryo} = biokaasun kryoteknisen jalostusprosessin investointikustannus (luottamuksellinen tieto)

$k_{\text{kryokromatografi}}$ = syöttöpisteeseen asennettavan kromatografin investointikustannus (luottamuksellinen tieto)

$k_{\text{syöttö}}$ = biokaasun syöttöpisteen investointikustannus (luottamuksellinen tieto)

k_{laitos} = biokaasun jalostuslaitoksen oheislaitteiden investointikustannus (luottamuksellinen tieto)

$k_{\text{kompressori}}$ = kompressorin investointikustannus (luottamuksellinen tieto)

Nesteytetyn siirron käyttökustannukset kk_{kryo} lasketaan seuraavasti:

$$kk_{\text{kryo}} = K_1 + K_2 + K_3 + K_4 + K_5 + K_6 \quad [€/a] \quad (13)$$

missä

K_1 = biokaasun jalostuslaitoksen ja keskitetyn syöttöpisteen käyttökustannukset (luottamuksellinen tieto)

K_2 = kryoteknisen biokaasun jalostuslaitoksen sähkökustannus, joka on

$$K_2 = h * rk * S_{\text{kryo}} * S_{\text{hinta}} \quad [€/a] \quad (14)$$

jossa

S_{kryo} = jalostusprosessin sähkön kulutus raakakaasukuutiota kohden (luottamuksellinen tieto) [kWh/nm^3]

K_3 = nesteytetyn biokaasun kuljetuskustannus, joka on laskettu jäljempänä kaavassa (16).

K_4 = höyrytetyn biokaasun kompressorin sähkökustannus joka on sama kuin kaavassa (8).

K_5 = höyrytetyn biokaasun kompressorin käyttökustannus joka on sama kuin kaavassa (9).

K_6 = nesteytetyn biokaasun kuljetusketjussa tapahtuva boil-off hävikkikustannus, joka lasketaan jäljempänä kappaleessa 5.3 hiilijalanjälkitarkastelussa lasketun kaasumaisen boil-off hävikin määrästä $\text{BOG}_{\text{yhteensä}}$ muuttamalla se ensin nestemäisiksi kuutioiksi jakamalla 600:lla ja kertomalla nesteytetyn biokaasun lämpöarvolla (13,7 MWh/t) ja hinnalla (luottamuksellinen tieto).

Nesteytetyn biokaasun kuljetuskustannus lasketaan huomioimalla kuljetusperäkärryn pääomakustannus sekä vetoauton kuljetuskustannukset. Vetoauton kuljetuskustannukset perustuvat kuljetusyriytyksen sopimushintoihin.

Kuljetuskustannusten selvittämiseksi lasketaan ensin tarkastelun kohteena olevan laitoksen vuosittaisten kuljetusten lukumäärä n_{lastit} laskemalla ensin jalostetun nestemäisen biokaasun varastosäiliön nettotilavuuden V_1 suhde kuljetussäiliön

nettotilavuuteen V_2 , jolloin saadaan selville montako kuljetussäiliöllistä yksi varastosäiliöllinen tarvitsee. Tämä tulos jaetaan tuotetulla nestemäisellä biokaasumäärällä, jotta saadaan yhden varastosäiliöllisen täyttymiseen kuluva tuntimäärä. Vuoden tunnit (8760 h) jaetaan saadulla osamäärällä, joka kertoo vuosittaisten kuormien lukumäärän. Tuotettu nestemäinen biokaasu saadaan jakamalla kaasumaisen biokaasun määrä luvulla 600. Laskentakaava on seuraava:

$$n_{\text{lastit}} = 8760 / \left(\frac{V_1/V_2}{jk/600} \right) \quad (15)$$

missä

$$\begin{aligned} V_1 &= \text{jalostetun nestemäisen biokaasusäiliön varaston nettotilavuus} \\ &= 90 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_2 &= \text{jalostetun nestemäisen biokaasun kuljetussäiliön nettotilavuus} \\ &= 50,4 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Kun vuosittaisten kuljetusten lukumäärä n_{lastit} on laskettu, voidaan kuljetusten sunnuntaityötuntien lisäksi $k_{\text{sunnuntai}}$ arvioida laskemalla sunnuntaipäiville osuvat kuljetukset. Koska viikossa on yksi sunnuntai ja seitsemän päivää, saadaan sunnuntaikuljetukset $n_{\text{sunnuntait}}$ selville jakamalla n_{lastit} seitsemällä. Sunnuntaityötunnit kohdistuvat siis lastaus- ja purkutunteihin, joita on 2 + 2 h. Autokuljetus on hinnoiteltu siten, että yhden kuorman perushinta k_{perus} sisältää kaksi tuntia lastausta ja kaksi tuntia purkua. Lisäksi kullekin kuljetetulle kilometrille on olemassa kilometrikohtainen hinta k_{km} sekä kuljetukselle on olemassa kilometrikohtainen huoltohintaa k_{huolto} , mutta vuositasolla huoltokustannusten minimiksi on asetettu summa, joka edellyttää 450 km:n edestakaista kuljetusmatkaa. Yli 450 km:n edestakainen kuljetusmatka on kuitenkin selvästi putkisiirron mahdollisuuksien ulkopuolella, eli vertailu sitä pidemmällä matkoilla ei ole enää relevanttia. Tästä syystä kuljetuskustannusten laskennassa käytetään kiinteää huoltokustannusminimiä $k_{\text{minhuolto}}$.

Vuosittaisten kuljetuskustannusten suuruus K_3 voidaan siis laskea seuraavasti:

$$K_3 \quad = n_{\text{lastit}} * (k_{\text{perus}} + 4 * n_{\text{sunnuntai}} * k_{\text{sunnuntai}}) + d * k_{\text{km}} + k_{\text{minhuolto}} + k$$

[€/a](16)

missä

n_{lastit}	= kuljetuskertojen lukumäärä vuodessa
k_{perus}	= kuljetuskerran perusmaksu (luottamuksellinen tieto)
$n_{\text{sunnuntai}}$	= sunnuntaiksi osuvat kuljetuskerrat
$k_{\text{sunnuntai}}$	= sunnuntaisä €/h (luottamuksellinen tieto)
d	= kuljetusmatka km
k_{km}	= kuljetusveloitus €/km (luottamuksellinen tieto)
$k_{\text{minhuolto}}$	= minimiveloitus kuljetuksen huoltokuluista €/a (luottamuksellinen tieto)
k	= kuljetusperäkärryn pääomakulu (luottamuksellinen tieto), joka lasketaan kuljetusperäkärryn investoinnista kaavalla (1)

Nesteytetyn siirron vuosittainen kustannus siis muodostuu pääoma- ja käyttökuluista ja on vuodessa:

$$K_{\text{kryo}} = k + k k_{\text{kryo}} \quad [\text{€/a}] \quad (17)$$

Tästä voidaan laskea putkisiirron ominaiskustannus seuraavasti:

$$OK_{\text{kryo}} = \frac{K_{\text{kryo}}}{h \cdot j \cdot k} \quad [\text{€/nm}^3] \quad (18)$$

Nesteytetyn siirron ominaiskustannus OK_{kryo} vaihtelee kuljetuskustannusten K_3 mukaan, joka muuttuu kuljetusmatkan pituuden d mukaan. On huomattava, että kuljetusmatka on kaksinkertainen kohteiden etäisyyteen verrattuna, sillä kuljetuskalusto joutuu palaamaan tyhjänä takaisin tuotantokohteeseen. Varioimalla nesteytetyn biokaasun kuljetusmatkaa d saadaan sivulla 58 kuvassa 8 esitetty kuvaaja biokaasun nesteytetyn siirron ominaiskustannuksista OK_{kryo} .

6.1.4 Johtopäätöksiä nesteytetyn siirron kustannuslaskennasta

Nesteytetyn siirron ominaiskustannus on lähes vaakasuora lineaarinen käyrä, jonka perusteella voidaan päätellä, että kuljetusetäisyyden merkitys kuljetuskustannukseen on erittäin vähäinen. Tämä johtuu siitä, että kullekin kuormalle on peruskustannus

k_{perus} , joka on suhteellisesti suuri verrattuna kilometripohjaiseen kuljetuskustannukseen k_{km} .

6.1.5 Putkisiirron hiilijalanjälki

Putkisiirron hiilijalanjälki $\text{CO}_2_{\text{putki}}$ lasketaan kuljetuksen ja prosessin aikana käytetystä energiamäärästä ja siten syntyneistä hiilidioksidipäästöistä sekä prosessin aikana tapahtuvista metaanipäästöistä. Metaanipäästöt jalostusprosessissa muunnetaan muuntokertoimella vastaamaan hiilidioksidin kasvihuonekaasuvaikutusta. Putkisiirron hiilijalanjälki jalostettua biokaasukuutiota kohden voidaan laskea seuraavasti:

$$\text{CO}_2_{\text{putki}} = \text{CO}_2_{\text{jalostus}} + \text{CO}_2_{\text{lämpö}} + \text{CO}_2_{\text{sähkö}} \quad [\text{gCO}_2/\text{nm}^3] \quad (19)$$

missä

$\text{CO}_2_{\text{jalostus}}$ = biokaasun jalostuslaitoksen metaanipäästön hiilijalanjälki

$\text{CO}_2_{\text{lämpö}}$ = biokaasun jalostuslaitoksen lämmön käytön hiilijalanjälki

$\text{CO}_2_{\text{sähkö}}$ = biokaasun jalostuslaitoksen sähkön käytön hiilijalanjälki

Biokaasun jalostuslaitoksen metaanipäästön hiilijalanjälki $\text{CO}_2_{\text{jalostus}}$ lasketaan perustuen jalostuslaitoksen metaanipäästö määrään V_{jalostus} seuraavasti:

$$\text{CO}_2_{\text{jalostus}} = \frac{V_{\text{jalostus}} \cdot \rho \cdot m}{jk} \cdot 1000 \quad [\text{gCO}_2/\text{nm}^3] \quad (20)$$

missä

V_{jalostus} = jalostuslaitoksen metaanipäästö [nm^3/h] (luottamuksellinen tieto)

ρ = maakaasun tiheys = $0,73 \text{ kg}/\text{nm}^3$

m = muuntokerroin, jolla muunnetaan metaanin kasvihuonekaasuvaikutus vastaamaan hiilidioksidin vaikutusta = 25

Edelleen, jalostuslaitoksen lämmön käytön hiilijalanjälki $\text{CO}_2_{\text{lämpö}}$ lasketaan seuraavasti:

$$\text{CO}_2_{\text{lämpö}} = \frac{\left[\frac{(\text{prosessi} \cdot rk)}{\eta} \cdot ihv \cdot pk_{\text{kaasu}} \right]}{jk} \quad [\text{gCO}_2/\text{nm}^3] \quad (21)$$

missä

I_{prosessi}	= jalostusprosessin lämmön kulutus raakakaasukuutiota kohden (luottamuksellinen tieto) [kWh/ nm ³]
η	= lämmityskattilan hyötysuhde = 92 %
lhv_1	= maakaasun alempi lämpöarvo = 10,1 kWh/nm ³
lhv	= maakaasun alempi lämpöarvo = 36,044 MJ/nm ³
$p_{k_{\text{kaasu}}}$ gCO ₂ /MJ	= maakaasun hiilidioksidin ominaispäästökerroin = 55,06

Biokaasun jalostuslaitoksen sähkön käytön hiilijalanjälki CO₂_{sähkö} lasketaan kaavalla:

$$CO_{2\text{sähkö}} = \frac{(s_{\text{prosessi}} * rk + s_{\text{kompressori}} * jk) * p_{k_{\text{sähkö}}}}{jk} \quad [gCO_2/nm^3] \quad (22)$$

missä

s_{prosessi}	= jalostusprosessin sähkön kulutus raakakaasukuutiota kohden (luottamuksellinen tieto) [kWh/ nm ³]
$s_{\text{kompressori}}$	= kompressorin sähkön kulutus jalostettua biokaasukuutiota kohden [kWh/ nm ³]
$p_{k_{\text{sähkö}}}$ gCO ₂ /kWh	= sähkön hiilidioksidin ominaispäästökerroin = 217,8

6.1.6 Johtopäätöksiä putkisiirron hiilijalanjälkilaskennasta

Periaatteessa biokaasun muodossa tapahtuvaa metaanipäästöä ei tarvitsisi ottaa hiilijalanjälkilaskennassa huomioon, koska metaani on peräisin biopohjaisesta raaka-aineesta. Biopohjainen metaani- tai hiilidioksidipäästö käsitellään yleensä hiilidioksidineutraalina päästönä. Tässä laskennassa se kuitenkin huomioidaan, koska biokaasu on kauppatuote ja sen hukka tulisi minimoida. Näin kuljetuksessa ja prosessissa hukattu biokaasumäärä vaikuttaa myös vertailuun ja pienemmän hukan vaihtoehto nousee vertailussa paremmaksi.

6.1.7 Nesteytetyn siirron hiilijalanjälki

Nesteytetyn siirron hiilijalanjälki CO₂_{neste} lasketaan kuljetuksen ja prosessin aikana käytetystä energiamäärästä ja siten syntyneistä hiilidioksidipäästöistä sekä prosessin aikana tapahtuvista metaanipäästöistä. Metaanipäästöt jalostusprosessissa muunnetaan

muuntokertoimella vastaamaan hiilidioksidin kasvihuonekaasuvaikutusta. Nesteytetyn siirron hiilijalanjälki jalostettua biokaasukuutiota kohden voidaan laskea seuraavasti:

$$\text{CO2}_{\text{neste}} = \text{CO2}_{\text{kryo}} + \text{CO2}_{\text{BOG}} + \text{CO2}_{\text{kryosähkö}} + \text{CO2}_{\text{auto}}$$

$$[\text{gCO}_2/\text{nm}^3] \quad (23)$$

missä

CO2_{kryo} = biokaasun kryoteknisen jalostuslaitoksen metaanipäästön hiilijalanjälki

CO2_{BOG} = biokaasun kryoteknisen jalostuslaitoksen, varastosäiliöiden ja kuljetusperävaunun boil-off kaasun hiilijalanjälki

$\text{CO2}_{\text{kryosähkö}}$ = biokaasun kryoteknisen jalostuslaitoksen sähkön käytön hiilijalanjälki

CO2_{auto} = autokuljetuksen hiilijalanjälki

Biokaasun jalostuslaitoksen metaanipäästön hiilijalanjälki CO2_{kryo} lasketaan perustuen jalostuslaitoksen metaanipäästömäärään V_1 seuraavasti:

$$\text{CO2}_{\text{kryo}} = \frac{V_{\text{kryo}} * \rho * m}{jk} * 1000 \quad [\text{gCO}_2/\text{nm}^3] \quad (24)$$

missä

V_{kryo} = kryoteknisen jalostuslaitoksen metaanipäästö [nm^3/h] (luottamuksellinen tieto)

ρ = maakaasun tiheys = $0,73 \text{ kg}/\text{nm}^3$

m = muuntokerroin, jolla muunnetaan metaanin kasvihuonekaasuvaikutus vastaamaan hiilidioksidin vaikutusta = 25

Kryoteknisen jalostuslaitoksen, varastosäiliöiden ja kuljetusperävaunun boil-off - kaasun hiilijalanjälki CO2_{BOG} lasketaan varastosäiliön koon V_1 sekä kuljetussäiliön koon V_2 ja vuosittaisen boil-off määrän perusteella. Kuljetusketjussa on tuotantolaitoksella yksi varastosäiliö, auton kuljetussäiliö ja yksi varastosäiliö keskitetyn syötön kohteessa. Varastosäiliöt ovat tilavuudeltaan 100 m^3 ja täyttöasteen maksimi on 90 %. Kuljetussäiliön täyttöaste on $50,4 \text{ m}^3$. Tyypillinen boil-off -kaasun määrä on 0,12 % tilavuudesta päivässä (365 d/a). Nestemäisenä laskettu boil-off -kaasun määrä saadaan muutettua kaasumaiseksi kertomalla se luvulla 600. Mikään säiliöistä ei ole koko ajan täynnä tai tyhjänä, vaan keskimäärin kussakin säiliössä on puolet säiliön nettotilavuudesta nesteytettyä biokaasua. Koko ketjun boil-off -kaasun määrä $\text{BOG}_{\text{yhteensä}}$ vuodessa nestemäisenä [m^3/a] lasketaan seuraavalla kaavalla ja muutetaan kaasumaiseksi kertomalla luvulla 600:

$$BOG_{\text{yhteensä}} = \left(2 * \frac{V_1}{2} + \frac{V_2}{2}\right) * 0,12\% * 365 * 600 \text{ [nm}^3\text{/a]} \quad (25)$$

missä

$$V_1 = \text{jalostetun nestemäisen biokaasusäiliön varaston nettotilavuus} \\ = 90 \text{ m}^3$$

$$V_2 = \text{jalostetun nestemäisen biokaasun kuljetussäiliön nettotilavuus} \\ = 50,4 \text{ m}^3$$

Boil-off -kaasun hiilijalanjälki lasketaan:

$$CO2_{\text{BOG}} = \frac{BOG_{\text{yhteensä}} * \rho * m}{(jk * h) - BOG_{\text{yhteensä}} * 600} * 1000 \text{ [gCO}_2\text{/nm}^3\text{]} \quad (26)$$

missä

$$\rho = \text{maakaasun tiheys} = 0,73 \text{ kg/nm}^3$$

m = muuntokerroin, jolla muunnetaan metaanin kasvihuonekaasuvaikutus vastaamaan hiilidioksidin vaikutusta = 25

Kryoteknisen biokaasun jalostuslaitoksen sähkön käytön hiilijalanjälki

$CO2_{\text{kryosähkö}}$ lasketaan kaavalla:

$$CO2_{\text{kryosähkö}} = \frac{(s_{\text{kryo}} * rk) + (s_{\text{kompresori}} + a_{\text{auto1}} + a_{\text{auto2}} + a_{\text{autos}}) * jk) * pk_{\text{sähkö}}}{jk - BOG_{\text{yhteensä}} * 600} \text{ [gCO}_2\text{/nm}^3\text{]}$$

(27)

missä

$$s_{\text{kryo}} = \text{jalostusprosessin sähkön kulutus raakakaasukuutiota kohden} \\ \text{(luottamuksellinen tieto) [kWh/ nm}^3\text{]}$$

$$s_{\text{kompresori}} = \text{kompessorin sähkön kulutus jalostettua biokaasukuutiota} \\ \text{kohden [kWh/ nm}^3\text{]}$$

$s_{\text{auto1, 2, 3}}$ = auton ja kuljetusperävaunun sähkön kulutuksia eri vaiheissa jalostettua biokaasukuutiota kohden [kWh/ nm³]

$$pk_{\text{sähkö}} = \text{sähkön hiilidioksidin ominaispäästökerroin} = 217,8 \\ \text{gCO}_2\text{/kWh}$$

Autokuljetuksen hiilijalanjälki $CO2_{\text{auto}}$ lasketaan seuraavasti:

$$\text{CO}_{2\text{auto}} = \frac{f_{\text{auto}} * \text{lhv}_{\text{diesel}} * \rho_{\text{diesel}} * \text{pk}_{\text{diesel}} * d}{V_2 * 600} * 2$$

$$[\text{gCO}_2/\text{nm}^3] \quad (27)$$

missä

$$f_{\text{auto}} = \text{kuljetusauton polttoaineen ominaiskulutus} = 0,83 \text{ l/km}$$

$$\text{lhv}_{\text{diesel}} = \text{dieselpolttoaineen lämpöarvo} = 43 \text{ MJ/kg}$$

$$\rho_{\text{diesel}} = \text{dieselpolttoaineen tiheys} = 0,845 \text{ kg/l}$$

$$\text{pk}_{\text{diesel}} = \text{dieselpolttoaineen hiilidioksidin ominaispäästökerroin} = 73,6 \text{ gCO}_2/\text{MJ}$$

$$d = \text{kuljetusmatka km}$$

Nesteytetyn siirron autokuljetuksen hiilijalanjälki $\text{CO}_{2\text{auto}}$ vaihtelee kuljetusmatkan pituuden d mukaan. Autokuljetuksen hiilijalanjälki $\text{CO}_{2\text{auto}}$ kerrotaan laskentakaavassa kahdella, koska auto joutuu palaamaan tyhjänä takaisin. Varioimalla nesteytetyn biokaasun kuljetusmatkaa d saadaan kuvassa 9 esitetty kuvaaja biokaasun nesteytetyn siirron hiilijalanjäljestä $\text{CO}_{2\text{neste}}$.

6.1.8 Johtopäätöksiä nesteytetyn siirron hiilijalanjälkilaskennasta

Kuten putkisiirroissa, biokaasun muodossa tapahtuvaa metaanipäästöä ei tarvitsisi ottaa hiilijalanjälkilaskennassa huomioon, koska metaani on peräisin biopohjaisesta raaka-aineesta. Biopohjainen metaani- tai hiilidioksidipäästö yleensä käsitellään hiilidioksidineutraalina päästönä. Tässä laskennassa se kuitenkin huomioidaan vertailukelpoisuutta parantavana tekijänä.

6.1.9 Putkisiirron energiankulutus

Putkisiirron energiankulutus jalostettua biokaasukuutioita kohden E_{putki} voidaan helposti laskea hiilidioksidijalanjäljen avulla. Laskenta tapahtuu seuraavasti:

$$E_{\text{putki}} = E_{\text{jalostus}} + E_{\text{lämpö}} + E_{\text{sähkö}} \quad [\text{kWh}/\text{nm}^3] \quad (28)$$

missä

$$E_{\text{jalostus}} = \text{biokaasun jalostuslaitoksen metaanipäästön energiankulutus}$$

$$E_{\text{lämpö}} = \text{biokaasun jalostuslaitoksen lämmön käytön energiankulutus}$$

$E_{\text{sähkö}}$ = biokaasun jalostuslaitoksen sähkön käytön energiankulutus

Yksittäisten energiankulutuskomponenttien laskenta tapahtuu seuraavasti

$$E_{\text{jalostus}} \quad = (\text{CO}_2_{\text{jalostus}} * \text{lhv}_1) / (m * 1000 * \rho) \quad (29)$$

[kWh/nm³]

missä

m = muuntokerroin, jolla muunnetaan metaanin kasvihuonekaasuvaikutus vastaamaan hiilidioksidin vaikutusta = 25

ρ = maakaasun tiheys = 0,73 kg/nm³

lhv_1 = maakaasun alempi lämpöarvo = 10,1 kWh/nm³

ja

$$E_{\text{lämpö}} \quad = \text{CO}_2_{\text{lämpö}} * \text{lhv}_1 / \text{pk}_{\text{kaasu}} * \text{lhv} \quad (30)$$

[kWh/nm³]

missä

lhv_1 = maakaasun alempi lämpöarvo = 10,1 kWh/nm³

lhv = maakaasun alempi lämpöarvo = 36,044 MJ/nm³

pk_{kaasu} = maakaasun hiilidioksidin ominaispäästökerroin = 55,06
gCO₂/MJ

ja

$$E_{\text{sähkö}} \quad = \text{CO}_2_{\text{sähkö}} / \text{pk}_{\text{sähkö}} \quad [\text{kWh/nm}^3] \quad (31)$$

missä

$\text{pk}_{\text{sähkö}}$ = sähkön hiilidioksidin ominaispäästökerroin = 217,8
gCO₂/kWh

6.1.10 Nesteytetyn siirron energiankulutus

Nesteytetyn siirron energiankulutus jalostettua biokaasukuutioita kohden E_{neste} voidaan laskea hiilidioksidijalanjäljen avulla. Laskenta tapahtuu seuraavasti:

$$E_{\text{neste}} = E_{\text{kryo}} + E_{\text{BOG}} + E_{\text{kryosähkö}} + E_{\text{auto}} \quad [\text{gCO}_2/\text{nm}^3] \quad (32)$$

missä

E_{kryo} = biokaasun kryoteknisen jalostuslaitoksen metaanipäästön energiankulutus

E_{BOG} = biokaasun kryoteknisen jalostuslaitoksen, varastosäiliöiden ja kuljetusperävaunun boil-off -kaasun energiankulutus

$E_{\text{kryo\text{ähkö}}}$ = biokaasun kryoteknisen jalostuslaitoksen sähkön käytön energiankulutus

E_{auto} = autokuljetuksen energiankulutus

Yksittäisten energiankulutuskomponenttien laskenta tapahtuu seuraavasti

$$E_{\text{kryo}} \quad = (\text{CO2}_{\text{kryo}} * \text{lhv}_1) / (m * 1000 * \rho)$$

$$[\text{kWh}/\text{nm}^3] \quad (33)$$

missä

m = muuntokerroin, jolla muunnetaan metaanin kasvihuonekaasuvaikutus vastaamaan hiilidioksidin vaikutusta = 25

ρ = maakaasun tiheys = 0,73 kg/nm³

lhv_1 = maakaasun alempi lämpöarvo = 10,1 kWh/nm³

ja

$$E_{\text{BOG}} \quad = (\text{CO2}_{\text{BOG}} * \text{lhv}_1) / (m * 1000 * \rho)$$

$$[\text{kWh}/\text{nm}^3] \quad (34)$$

missä

ja

$$E_{\text{sähkö}} \quad = \text{CO2}_{\text{sähkö}} / \text{pk}_{\text{sähkö}}$$

$$[\text{kWh}/\text{nm}^3] \quad (35)$$

missä

$\text{pk}_{\text{sähkö}}$ = sähkön hiilidioksidin ominaispäästökerroin = 217,8
gCO₂/kWh

ja

$$E_{\text{auto}} \quad = (2 * d * \text{CO2}_{\text{auto}}) / (\text{pk}_{\text{diesel}} * 3,6)$$

$$[\text{kWh}/\text{nm}^3] \quad (36)$$

missä

$\text{pk}_{\text{diesel}}$ = dieselpolttoaineen hiilidioksidin ominaispäästökerroin = 73,6
gCO₂/MJ

d = kuljetusmatka km

Nesteytetyn siirron autokuljetuksen energiankulutus E_{auto} vaihtelee kuljetusmatkan pituuden d mukaan. Autokuljetuksen energiankulutuksen E_{auto} laskennassa käytetään laskentakaavassa kerrointa kaksi, koska auto joutuu palaamaan tyhjänä takaisin.

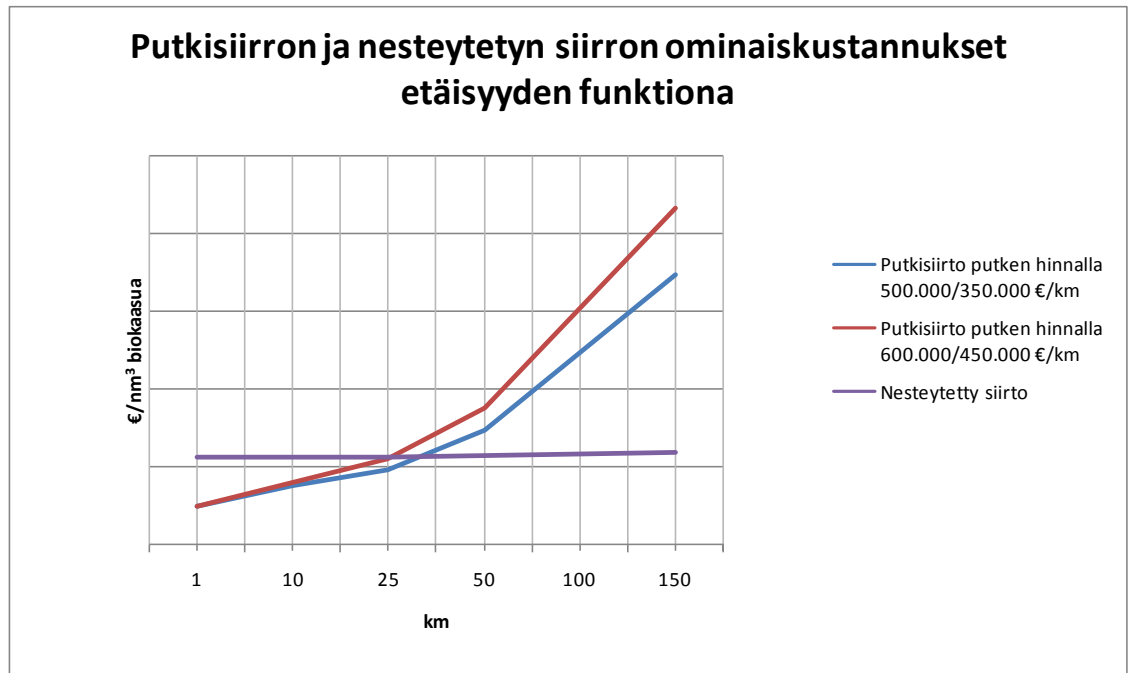
Varioimalla nesteytetyn biokaasun kuljetusmatkaa d saadaan kuvassa 10 esitetty kuvaaja biokaasun nesteytetyn siirron energiankulutuksesta E_{neste} .

6.2 Kustannukset

Siirretään biokaasu sitten kaasumaisena putkessa tai kuljetetaan nestemäisenä autolla, molempiin vaihtoehtoihin sitoutuu paljon pääomaa. Kustannuksia muodostuu putkisiirron osalta jalostuslaitoksen rakentamisesta, laitosrakenteista ja suunnittelusta, kromatografista ja kompressorista sekä jalostusprosessin vaatiman lämmön tuottamista varten olevasta kattilasta. Lisäksi kustannuksia aiheuttavat itse putkilinjan rakentaminen ja jalostuslaitoksen vuosittaiset käyttökustannukset. Nesteytetyn siirron osalta kustannuksia muodostuu jalostuslaitoksen rakentamisesta, laitosrakenteista, suunnittelusta, kromatografista sekä nestemäisen kaasun mittaukseen tarkoitettu näytteenottohöyrystimestä, keskitetyn syötön pisteestä, itse kuljetuksesta sekä laitoksen käyttökustannuksista. Tällä hetkellä Gasumin nesteytetyn maakaasun kuljetukset toteutetaan ostopalveluna.

Kuljetuskustannukset ryhmitellään perinteisesti kiinteisiin ja muuttuviin kustannuksiin. Kiinteät kustannukset muodostuvat kuljetuskaluston hankinnasta ja toimitusvalmiuden ylläpitämisestä. Toimittaessa tietyllä kapasiteetilla kiinteät kustannukset ovat suoritemäärästä ja toiminta-asteen (suoritemäärä kohdistettuna tietylle ajanjaksolle) muutoksista riippumattomia. Muuttuvia kustannuksia ovat kaikki näistä muutoksista riippuvat kustannukset. (Oksanen 2004: 59.)

Tarkkaa rajaa kiinteiden ja muuttuvien kustannusten välille on vaikea määrittää. Pitkällä aikavälillä tarkasteltaessa lähes kaikki kustannukset ovat muuttuvia, jos yrityksen kapasiteettia, organisaatiota, pääomarakennetta tai toimintaperiaatteita muutetaan. Ulkoistamalla kuljetuskaluston hankinta ja hinnoitteleamalla sen käyttö suoriteperusteisesti saadaan kuljetuskustannukset lähes kokonaan muuttuviksi. (Oksanen 2004: 59,60.)



Kuva 8. Jalostetun biokaasun kuljetusvaihtoehtojen kustannukset ($\text{€}/\text{nm}^3$ biokaasua, muuttujana matkan pituus)

Kuvassa 8 on esitetty biokaasun kuljetusvaihtoehtojen kustannukset kuljetettavan kilometrimäärän muuttuessa. Kuvasta on poistettu pystyakselin lukuarvot toimeksiantajan pyynnöstä. Jalostuslaitoksen ja keskitetyn syöttöpisteen osalta investointikustannukset on laskettu käyttäen 8 % korkoa ja 15 vuoden pitoaikaa. Oletuksena on myös, että jalostuslaitos on käynnissä 8 000 tuntia vuodessa, ja se tuottaa 510 m^3 jalostettua biokaasua tunnissa. Nestemäisen biokaasun autosiirron tapauksessa kustannukset muodostuvat vuosittaisesta pääomakulusta ja vuosittaisista käyttökustannuksista, johon lisätään kullekin kilometrimäärälle erikseen laskettu kuljetuksen kustannus, joka on siis lopputulokseen vaikuttava muuttuva tekijä. Kuljetuskustannus muodostuu peruskulusta, kilometrihinnasta sekä vuosittaisesta ajoneuvojen huoltokustannuksesta, jonka kuljetusyritys perii Gasumilta. Huoltokustannuksen osuus on minimi tiettyyn kilometrimäärään asti, ja tässä laskelmassa käytetyllä asteikolla se pysyy samana koko ajan. Kuljetuskustannusten laskennassa on oletettu keskitetyn syöttöpisteen sekä jalostuslaitoksen yhteydessä oleville varastointisäiliölle tietty täyttöaste, jonka mukaan on voitu laskea, kuinka usein auto joutuu kulkemaan laitoksen ja syöttöpisteen välillä. Tämän lisäksi on huomioitu myös, kuinka usein kuljetus sattuisi sunnuntaille, jolloin kuljetusyritys perii tuntikohtaisen sunnuntailisän.

Putkisiirron kustannukset muodostuvat vuosittaisesta pääomakulusta ja käyttökustannuksista, jotka on laskettu yhteen ja jaettu laitoksen vuodessa tuottamalle jalostetun biokaasun määrälle niin, että lopputuloksena on euroa/jalostettu biokaasukuutio. Muuttuvana tekijänä laskelmassa on putken kustannus (sisältäen suunnittelun ja työmaavalvonnan, laitteiden ja materiaalien, urakoiden sekä maanhankinnan kustannukset), joka riippuu putken pituudesta. Putkelle on saatu toimeksiantajalta indeksihinnat alle kymmenen sekä yli kymmenen kilometrin mittaisille putkille. Lähtötiedoissa käytetyn DN100-maakaasuputken suuntaa antavat kilometrihinnat ovat 500 000 € - 600 000 €/km (yli 0,5 km pitkät linjaukset, mutta alle 10 km) ja 350 000 € - 450 000 €/km (yli 10 km pitkät linjaukset). Putkelle on kussakin tapauksessa laskettu kaksi eri hintaa, joista toisessa on käytetty hintahaarukan alinta ja toisessa sen ylintä arvoa.

Nesteytetyn biokaasun kuljetuksen kustannukset pysyvät melko samalla tasolla matkan pituudesta riippumatta. Kuvaajan perusteella voidaan todeta, että putkikuljetuksen kustannukset muodostuvat selkeästi autokuljetusta suuremmiksi noin 25 kuljetuskilometrillä lähtien (laskettuna hintahaarukan ylemmillä arvoilla). Hintahaarukan alemmilla arvoilla laskettuna putkikuljetuksen kustannukset ylittävät autokuljetuksen kustannukset noin 30 kilometrin kohdalla. Tästä voidaan päätellä, että lyhyillä, noin alle 20 kilometrin matkoilla putkikuljetus tulee kokonaiskustannuksiltaan autokuljetusta edullisemmaksi.

Nesteytetyn siirron ominaiskustannus on lähes vaakasuora lineaarinen käyrä, jonka perusteella voidaan päätellä, että kuljetusetäisyyden merkitys kuljetuskustannukseen on erittäin vähäinen. Eri kustannuskomponenttien osuutta 10 km:n, 25 km:n ja 50 km:n tarkastelumatkoille putkisiirron osalta on esitetty taulukossa 2 alla sekä nesteytetyn siirron osalta 25 km:n kuljetusetäisyydelle taulukossa 3.

Taulukko 2 putkisiirron kustannusjakautuma kuljetusetäisyyden mukaan putken korkeammalla investointikustannuksella

Kuljetusetäisyys / km	10	25	50
Jalostuslaitoksen, kompressorin ja kromatografien investointi	35 %	25 %	16 %
Putken ja verkoston kromatografien investointi	45 %	60 %	75 %
Sähkökulut	11 %	8 %	5 %
Lämpökulut	1 %	1 %	1 %

Taulukko 3 Nesteytetyn siirron kustannusjakautuma 25 km:n kuljetusetäisyydellä

Kuljetusetäisyys / km	25
Jalostuslaitoksen ja kromatografiain investointi	54 %
Keskitetyn syöttöpisteen ja kompressorin investointi	5 %
Sähkökulut	20 %
Kuljetuskustannus	5 %
Muut käyttökulut	15 %

Taulukosta 3 voidaan päätellä, että nesteytetyn siirron kuljetuskustannus on vain 5 % kustannuksista, joten kuljetusetäisyyden muuttuminen ei merkittävästi vaikuta nesteytetyn siirron kustannustehokkuuteen. Tämä selittää nesteytetyn siirron lähes vakioarvoisen kuljetuskustannuksen. Toisaalta, taulukosta 2 nähdään putkisiirron tapauksessa valtaosan kustannuksista muodostuvan putken ja verkoston kromatografiain investoinnista, joka kasvaa nopeasti matkan pidentyessä. Tämä puolestaan selittää putkisiirron nopeasti nousevan kustannuskäyrän pituuden kasvaessa. Kuten edellä laskennan johtopäätöksissä todettiin, voitaisiin putken investoinnin pitoaikana käyttää huomattavasti pidempää aikaa, jolloin investointikustannusten osuus laskisi ja putkisiirron kustannuskäyrä loivenisi. Tällöin myös putkisiirron ja nesteytetyn siirron käyrien leikkauskohta siirtyisi oikealle. Jos käytetään putki-investoinnille alempaa investointikustannusta ja 50 vuoden pitoaikaa, siirtyy leikkauskohta noin 38 km:n kohdalle nyt kuvassa 8 esitetyn noin 30 km:n sijaan. Siirtymä ei kuitenkaan ole merkittävä ja siten pitoajan optimointia ei tässä tarkemmin ole esitetty.

6.3 Hiilijalanjälki

Sekä biokaasun auto- että putkikuljetuksesta syntyy hiilidioksidipäästöjä. Hiilijalanjälkilaskelmiin liittyvät arvot ja tarvittavat kaavat on saatu toimeksiantajalta. Niiden perusteella on tutkittu kuljetettavan matkan eri pituuksien vaikutuksia hiilijalanjälkeen. Putkisiirron hiilijalanjäljen laskennassa on huomioitu jalostuslaitoksen sähkön ja lämmön tarve ja niistä syntyvät hiilidioksidipäästöt ja jalostusprosessin metaanihöviöt. Putken rakentamisesta ja käytöstä ei tässä tutkimuksessa oleteta syntyvän hiilidioksidipäästöjä, joten hiilijalanjälkeä ei ole laskettu niiden osalta. Sähkön käytön osalta laskennassa on käytetty sähkön ominaishiilidioksidipäästöarvoa ja prosesseihin käytettävä lämpö on oletettu tuotettavaksi maakaasulla.

Hiilidioksidimäärä, jonka yhden maakaasukuution palaminen aiheuttaa, on saatu kertomalla maakaasun lämpöarvo maakaasun päästökertoimella. Autokuljetuksen osalta hiilijalanjäljen laskennassa on huomioitu jalostusprosessista syntyvät metaanihöviöt, jotka on muunnettu hiilidioksidiksi yleisen muuntokertoimen avulla. Lisäksi on laskettu koko ketjun sähkönkäyttö sekä boil-offina eli prosessin eri vaiheissa hävikkinä syntyvät metaanipäästöt. Prosessin eri vaiheissa nesteestä kaasuksi höyrystyvä biokaasu on huomioitu hävikkinä.

Kokonaishiilijalanjäljen laskemiseksi tähän on lisätty autokuljetuksen osuus, joka pohjautuu siihen, että dieselin ominaispäästökerroin on kerrottu auton ominaisenergiankulutuksella. Tästä saatava hiilidioksidipäästön määrä kilometriä kohden on jaettu yhdessä kuormassa olevalla biokaasun määrällä (kaasumaista kuutiota kohden) ja näin ollen saatu kuljetuksen hiilijalanjälki kaasumaista biokaasukuutiota kohden yhden kilometrin matkalla. Tämän pohjalta on ollut mahdollista laskea hiilijalanjälki eripituisille matkoille. Auton kulutuksen osalta on käytetty toimeksiantajan hankkimia oletusarvoja sekä kuljetusyritykseltä saatuja tietoja.



Kuva 9. Biokaasun kuljetusvaihtoehtojen kokonaishiilijalanjälki

Kuvasta 9 on poistettu pystyakselin lukuarvot toimeksiantajan pyynnöstä. Kuvasta voidaan päätellä, että putkisiirron aiheuttama hiilijalanjälki pysyy vakiona kuljetettavan matkan pituudesta riippumatta. Autokuljetuksen hiilijalanjälki puolestaan kasvaa kuljetettavan matkan pidentyessä, eli kuvaajassa sen käyrä nousee loivasti x-akselin arvon kasvaessa. Kuvaajaa tehtäessä kokeiltiin erilaisia asteikkoja, ja todettiin, että alle 50 kilometrissä autokuljetuksen osalta ei tapahtunut merkittäviä muutoksia hiilijalanjäljen osalta. Kuvan perusteella voidaan todeta, että autokuljetuksen hiilijalanjälki ei muodostu putkikuljetusta pienemmäksi koko tarkastelumatkalla. Autokuljetuksen hiilijalanjälkeä laskettaessa on huomioitu sekä biokaasun jalostuslaitoksen prosessien, keskitetyn syötön pisteen että kuljetuksen aiheuttamat päästöt. Myös putkisiirron osalta mukaan on laskettu jalostuslaitoksen prosesseista ja komprimoinnista syntyvät päästöt, mutta ei putken rakentamisesta syntyviä hiilidioksidipäästöjä.

Nesteytetyn siirron hiilijalanjälkikuvaaja on lähes vakion suuruinen tarkasteltavalla kuljetusetäisyydellä, joka johtuu siitä, että kuljetuksen osuus energian käytöstä ja siten hiilidioksidipäästöistä on suhteellisesti pieni. Näin pidempi kuljetusetäisyys ei sanottavasti lisää hiilijalanjäljen suuruutta, vaan hiilidioksidipäästöt ovat pääosin peräisin muista prosessin vaiheista. Hiilijalanjäljen koostuminen ketjun eri osista 10 km:n kuljetusetäisyydellä on esitetty taulukossa 4 alla. Osuudet eivät merkittävästi muutu, vaikka kuljetusetäisyys kasvaisikin. Alle yhden prosentin osuus koko hiilijalanjäljestä siis muodostuu autokuljetuksen hiilijalanjäljestä $CO_{2,auto}$, joten kuljetusmatkan kasvattaminen ei vaikuta koko hiilijalanjäljen suuruuteen juuri lainkaan.

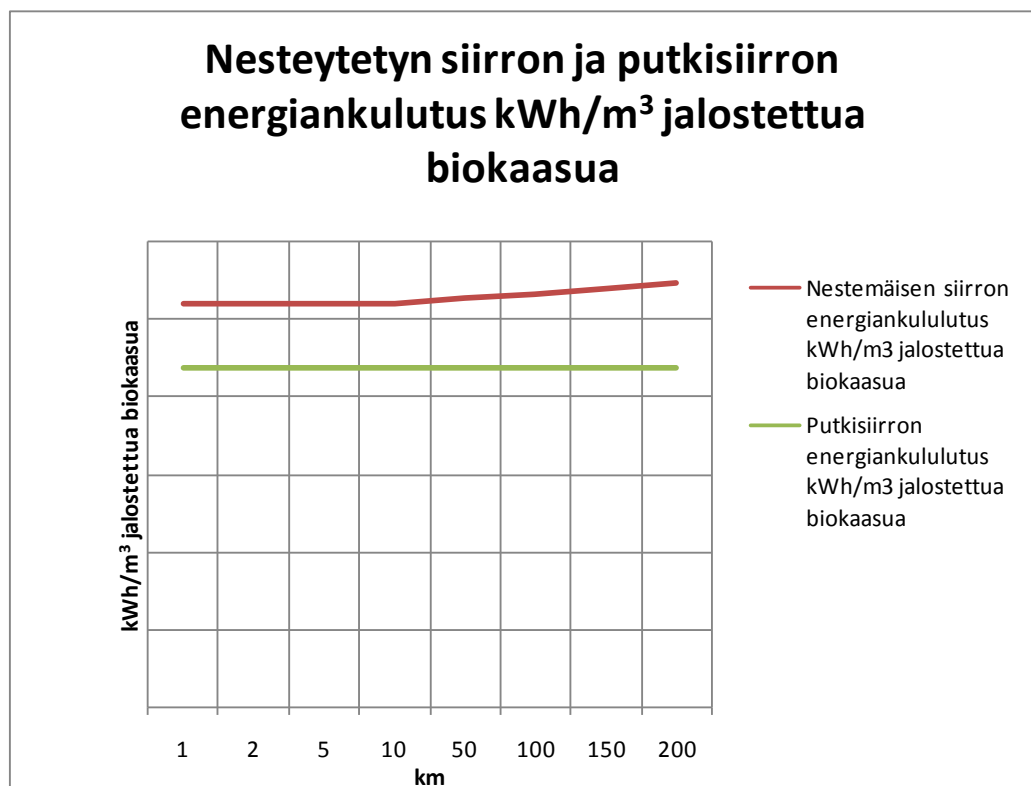
Taulukko 4 Nesteytetyn siirron eri vaiheiden osuus hiilijalanjäljestä

	Osuus kuljetusetäisyydellä 10 km	jalostettua biokaasukuutiota kohden
CH₄ häviöiden hiilijalanjälki	4,2 %	gCO ₂ /nm ³
Boil-off CH₄ häviöiden hiilijalanjälki	37,9 %	gCO ₂ /nm ³
Sähkökäytön hiilijalanjälki	57,7 %	gCO ₂ /nm ³
Kuljetuksen hiilijalanjälki	0,2 %	gCO ₂ /nm ³

Putkisiirron hiilijalanjäljen laskennassa tekijänä ei edellä esitetyn laskennan mukaan ole lainkaan siirtomatkan etäisyys ja siten putkisiirron hiilijalanjäljen arvo on vakio siirtomatkasta riippumatta. Vakioarvon syynä on se, että hiilijalanjälkeen putkisiirrosta vaikuttaa vain jalostetun biokaasun kompressorin energiankulutus. Edellä esitetyissä putkisiirron kustannuslaskennan johtopäätöksissä todettiin, että alle 150 km:n matkoilla kompressorin energiankäytön muutos on marginaalinen. Siten myös sen vaikutus putkisiirron hiilijalanjäljen suuruuteen on marginaalinen, minkä vuoksi kompressorin energiakäyttöä ei hiilijalanjälkilaskennassa varioida.

6.4 Energiatehokkuus

Sekä biokaasun auto- että putkikuljetuksessa käytetään energiaa. Käytetty energia siirrettyä jalostettua biokaasukuutiota kohden saadaan laskemalla kunkin energiakomponentin osuus kerrottuna hiilidioksidin ominaispäästökertoimella. Tähän liittyvät arvot ja tarvittavat tiedot perustuvat jo edellä esitettyyn hiilijalanjälkilaskelmaan. Niiden perusteella on syötetty taulukkokaavaan kuljetettavan matkan eri pituuksia, minkä jälkeen tulokset on esitetty graafisesti.



Kuva 10. Nesteytetyn siirron ja putkisiirron energiankulutus jalostettua biokaasukuutioita kohden eri kuljetusetäisyyksillä

Kuvasta 10 on poistettu pysty akselin lukuarvot toimeksiantajan pyynnöstä. Kuvasta voidaan nähdä, että putkisiirron energiankulutus pysyy vakiona kuljetettavan matkan pituudesta riippumatta. Autokuljetuksen energiankulutus puolestaan kasvaa kuljetettavan matkan pidentyessä, eli kuvaajassa sen käyrä nousee loivasti x-akselin arvon kasvaessa. Kuvan perusteella voidaan todeta, että autokuljetuksen energiankulutus ei muodostu putkikuljetusta pienemmäksi koko tarkastelumatkalla. Kuten putkisiirron hiilijalanjälkilaskennassa, samasta syystä putkisiirron energiankulutus ei ole riippuvainen kuljetusmatkasta. Todellisuudessa kuljetusmatkalla on merkitystä, mutta kun tarkastelu ulottuu suurusluokaltaan 150 km:n matkalle, ei painehäviö ole merkittävä eikä näin ollen vaikuta oleellisesti putkisiirron energiankulutukseen.

Nesteytetyn siirron energiankulutus on lähes lineaarinen, aivan kuten hiilijalanjälki. Syykin on sama: kuljetuksen osuus energian käytöstä ja siten hiilidioksidipäästöistä on suhteellisesti pieni ja näin pidempi kuljetusetäisyys ei sanottavasti lisää hiilijalanjäljen suuruutta, vaan hiilidioksidipäästöt ovat pääosin peräisin prosessin muista vaiheista. Energiankulutuksen koostuminen ketjun eri osista 10 km:n kuljetusetäisyydellä on esitetty taulukossa 5 alla. Osuudet eivät merkittävästi muutu, vaikka kuljetusetäisyys kasvaisikin. Alle yhden prosentin osuus koko energiankulutuksesta siis muodostuu autokuljetuksen energiankulutuksesta, joten kuljetusmatkan kasvattaminen ei vaikuta koko energiankulutuksen suuruuteen juuri lainkaan.

Taulukko 5 Nesteytetyn siirron eri vaiheiden osuus energiankulutuksesta

	Osuus kuljetusetäisyydellä 10 km	jalostettua biokaasukuutiota kohden
CH₄ häviöiden energiankulutus	0,8 %	kWh/nm ³
Boil-off CH₄ häviöiden energiankulutus	7,2 %	kWh/nm ³
Sähkönkäytön energiankulutus	91,8 %	kWh/nm ³
Kuljetuksen energiankulutus	0,2 %	kWh/nm ³

Koska nesteytetyn siirron energiankulutuksesta valtaosa on sähkön käytöstä johtuvaa, on aiheellista vertailla jakaumaa myös putkisiirron kohdalla. Taulukossa 6 alla on

esitetty energiankulutuksen jakautuminen putkisiirrossa, josta voidaan myös todeta, että sähkön osuus on putkisiirrossakin suurin energiankäyttäjä.

Taulukko 6 Energiankulutuksen jakautuminen eri vaiheisiin putkisiirrossa

	Osuus kuljetusetäisyydellä 10 km	jalostettua biokaasukuutiota kohden
CH₄ häviöiden energiankulutus	1,9 %	kWh/nm ³
Sähkönkäytön energiankulutus	71,1 %	kWh/nm ³
Lämmityksen energiankulutus	27,0 %	kWh/nm ³

Oletuksena voisi olla myös, että tuotettua biokaasua käytettäisiin kuljetuksen energianlähteenä maakaasun sijaan. Tällöin biokaasun energiamäärästä noin 9...10 % käytettäisiin kuljetuksen energiatarpeisiin. Kahden siirtotavan keskinäinen ero on noin 1,4 %-yksikköä, joten energian kulutuksen suhteen ero on hyvin pieni. Tästä voidaan päätellä, että energiankulutuksen merkitys eri siirtotapojen välillä on hyvin vähäinen.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tälle opinnäytetyölle asetettu tavoite oli toimia toimeksiantajalle suuntaa antavana ohjeistuksena siitä, kumpi biokaasun kuljetusvaihtoehdoista tulee kustannuksiltaan edullisemmaksi, ympäristövaikutuksiltaan pienemmiksi ja energiankulutukseltaan alhaisemmaksi, kun varioidaan kuljetettavan matkan pituutta. Toisin sanoen yhdistämällä nämä kolme vertailukriteeriä voitiin arvioida kuljetusmuotojen keskinäistä paremmuutta. Työn tarkoituksena ei ollut optimoida liiketaloudellista kannattavuutta.

Työssä käytettiin monipuolisesti sekä Internet- että kirjall lähteitä. Paljon tietoa saatiin suoraan toimeksiantajalta sekä sähköpostitse että kokousten yhteydessä. Lähdetietoa aiheeseen löytyi melko paljon teoriaosuutta ajatellen, mutta tutkimuksen lopputuloksen ja työn tavoitteen kannalta merkittävimmät ja ajankohtaisimmat tiedot saatiin toimeksiantajalta. Biokaasuun liittyvää kirjallisuutta oli saatavilla vähän, ja maakaasuunkin liittyen kirjallisuuden tarjoamat tiedot olivat melko vanhoja.

Tutkimuksessa aiemmin esitettyjen laskentatulosten perusteella voidaan todeta, että putkisiirto on parempi siirtomuoto aina noin 25...30 kilometrin etäisyydelle saakka. Paremmuutta rajaa ainoastaan kustannustehokkuus, sillä kahdella muulla kriteerillä, ympäristövaikutusten ja energiatehokkuuden suhteen, putkisiirto on tarkasteluetäisyyden koko matkalla parempi vaihtoehto. Energiatehokkuudessa eron todetaan olevan hyvin pieni, noin 10 % energiakustannuksesta siirrettävää energiamäärää kohden. Tämä 10 % osuus on toisaalta kuitenkin suuri, koska tyypillisesti maakaasun siirtoverkon energiankulutus on noin 1,5 % siirrettävästä energiasta ja sähkön siirtoverkoissa noin 4 % siirrettävästä energiamäärästä (Suomilampi 27.12.2010). Merkittävä osa biokaasun siirron energiankulutuksesta syntyy kuitenkin biokaasun prosessoinnissa eikä itse siirrossa.

Hiilijalanjälkivertailussa voitaisiin ajatella käytettävän sähkön tuotannossa joko maakaasua tai biokaasua sekä lämmön tuotannossa maakaasun sijaan biokaasua. Koska nesteytetyn biokaasun siirron tapauksessa sähkön kulutus on suurempi kuin putkisiirrossa, voisi sähkön tuotannon muutos maa- tai biokaasulle vaikuttaa positiivisesti nesteytetyn siirron paremmuuteen. Kun laskelmissa käytetyn Suomen keskimääräisen sähköntuotannon päästökertoimen sijaan käytetään maakaasun päästökerrointa ja 90% hyötysuhdetta, nousee nesteytetyn siirron hiilijalanjäljen suhteellinen määrä noin 170%:sta noin 185%:iin putkisiirron hiilijalanjäljestä. Vaikka sähkön ja lämmön tuotannon ominaispäästökertoimena käytettäisiin biokaasun päästökerrointa (nolla), kasvaa nesteytetyn siirron hiilijalanjälki suhteessa putkisiirtoon edelleen. Näin ollen edes ympäristöystävällisemmän energiantuotanto ei muuta nesteytettyä siirtoa putkisiirtoa hiilijalanjäljen kannalta paremmaksi – syy siihen ovat nesteytetyn siirron suuremmat metaanipäästöt, jotka vaikuttavat hiilijalanjälkeen muita päästöjä enemmän.

Hiilijalanjälki voidaan suhteuttaa myös kustannuksiin käyttämällä hiilidioksiditonille esimerkiksi hintaa 30 €/t, joka pohjautuu työ- ja elinkeinoministeriön esitykseen energiaveroksi vuodelle 2011. Kun lasketaan hiilijalanjäljen vaikutus euroina, kasvaa matka noin kilometrillä, jolloin putkisiirto on kustannustehokkaampaa.

Työn tavoitteet saavutettiin, ja lopputuloksena saatiin selkeä vastaus tutkimusongelmaan. Kustannuksista saatiin toimeksiantajalta tarkat lähtötiedot, joiden perusteella pystyttiin muodostamaan graafinen esitys. Hiilijalanjälki ja

energiatehokkuus voitiin laskea kattavien prosesseittain eroteltujen lähtöarvojen perusteella ja myös niistä tehtiin graafinen esitys. Hiilijalanjäljen ja energiatehokkuuden osalta saadut tulokset auttoivat punnitsemaan kuljetusvaihtoehtoja ekologisesta näkökulmasta.

Tässä opinnäytetyössä tehdyissä laskelmissa käytettiin lähtöarvoina Nastolaan suunnitteilla olevan biokaasun jalostuslaitoksen alustavia kustannus- ja muita suunnitteluun liittyviä tietoja. Valmiit kustannustiedot koskivat putkisiirtoa, kryotekniikan osalta osa arvoista jouduttiin olettamaan. Kustannusten tarkemmassa tarkastelussa tulee huomioida mittakaavaedut, eli mitä suurempi laitos, sitä pienemmät kokonaiskustannukset. Nastolan laitos edustaa tyypillisintä jalostuslaitoskokoa, jonka perusteella saatuja kustannustietoja ei voida soveltaa sellaisenaan kaikkiin tapauksiin, mutta ne toimivat kuitenkin hyvin suuntaa-antavina viitteellisinä arvoina. Huomioon tulee ottaa myös se, että esimerkiksi sähkön ja kompressorin hinta sekä käytettävä korkoprosentti ja putken pitoaika ovat muuttuvia tekijöitä, jotka osaltaan vaikuttavat lopputulokseen. Mikäli biokaasun jalostuslaitoksia rakennetaan lisää, on huomioitava, että tällöin nesteytetyn biokaasun autokuljetuksen osalta keskitetyn syöttöpisteen sekä kuljetuskaluston sitoma kustannus jakautuu useamman laitoksen kesken ja tuo omalta osaltaan mittakaavaetuja nesteytetyn siirron tapaukseen.

Putkisiirron osalta saataisiin helposti kustannuspuolella mittakaavaetuja, sillä tähän tarkasteluun valittu DN100-putki on niin tilava, että sillä voitaisiin siirtää huomattavasti suurempi määrä kaasua, kuin mitä tässä tutkimuksessa tarkasteltiin. Toisaalta putkea voisi myös pienentää, jolloin kuljetuskustannukset alenisivat, mikä parantaisi putkisiirron asemaa nesteytettyyn nähden. Todellisuudessa paljon pienempää putkea ei kuitenkaan kannata asentaa, sillä sen rakentaminen maksaisi kuitenkin saman verran, koska tässä kokoluokassa itse putken osuus koko rakentamiskustannuksesta on hyvin pieni.

Tämän opinnäytetyön käsittelemään aiheeseen liittyvää selvitystä voisi jatkaa tutkimalla lisää esimerkiksi jalostus-kuljetusketjun prosesseissa syntyvien häviöiden eli boil-offien hyötykäytön sekä hiilidioksidin talteenoton mahdollisuuksia.

LÄHTEET

Biokaasu. Gasum Oy. Saatavissa:

<http://www.gasum.fi/liikenne/ymparisto/Sivut/Biokaasu.aspx> [viitattu 6.11.2010]

Biokaasun koostumus. Saatavissa:

http://www.liikennebiokaasu.fi/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=2&Itemid=3#B [viitattu 2.9.2010]

Energiaa ympäristöä kunnioittaen. Gasum Oy. Saatavissa:

http://www.gasum.fi/gasumyriyksena/tapa_toimia/Sivut/maakaasunymparistoimago.aspx [viitattu 3.8.2010]

Energiatohokkuus. Työ- ja elinkeinoministeriö. Saatavissa:

<http://www.tem.fi/index.phtml?s=2586> [viitattu 27.10.2010]

Energiatohokkuus ja ympäristö. Valtion ympäristöhallinto. Saatavissa:

<http://www.ymparisto.fi/default.asp?contentid=2194> [viitattu 27.10.2010]

Energiatohokkuusjärjestelmä. Elinkeinoelämän keskusliitto EK. Saatavissa:

http://www.ek.fi/yritysten_energiaopas/fi/energiatohokkuus/ETJ.php [viitattu 4.11.2010]

Energiatohokkuussopimukset. Motiva Oy. Saatavissa:

<http://www.motiva.fi/toimialueet/energiatohokkuussopimukset> [viitattu 4.11.2010]

Energiatohokkuussopimukset, yritysten velvoitteet. Elinkeinoelämän keskusliitto EK. Saatavissa:

http://www.ek.fi/yritysten_energiaopas/fi/energiatohokkuus/yrityksen_velvoitteet.php [viitattu 4.11.2010]

Forsström, J. 2009. Euroopan kaasunhankinnan malli. Helsinki: VTT. Saatavissa:

<http://www.vtt.fi/inf/pdf/workingpapers/2009/W123.pdf> [viitattu 20.11.2010]

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2009/28/EY 23.4.2009. Euroopan unionin virallinen lehti 5.6.2009.

Finland's Fifth National Communication under the United Nations Framework Convention on Climate Change. 2009. Ministry of the Environment and Statistics Finland, Helsinki.

Gasum Oy. Saatavissa:

<http://www.gasum.fi/gasumyriyksenayritysinfo/Sivut/Omistajat.aspx> [viitattu 27.7.2010]

Gasum vuosikertomus 2009: 27.

Gasum vuosikertomus 2009: 11.

Hiilijalanjälki. Natural Interest Oy. Saatavissa:

<http://www.naturalinterest.fi/fi/footprints/carbon-footprint> [viitattu 22.10.2010]

Hokkanen, S., Karhunen, J. & Luukkanen M. 2004. Logistisen ajattelun perusteet. Jyväskylä: SHO Business Development Oy

How pipelines work. Société des Transports Pétroliers par pipelines (Trapil).

Saatavissa: <http://www.trapil.fr/uk/comcamarche4.asp> [viitattu 12.2.2011]

Ilmastonmuutoksen hillitseminen. Valtion ympäristöhallinto. Saatavissa:

<http://www.ymparisto.fi/default.asp?contentid=321791&lan=fi&clan=fi> [viitattu 29.10.2010]

Ilmastonmuutos. Valtion ympäristöhallinto. Saatavissa:

<http://www.ymparisto.fi/default.asp?contentid=322153&lan=fi> [viitattu 29.10.2010]

Järjestelmävastaavan asettamat ehdot järjestelmävastuun toteuttamiseksi. Gasum Oy. 2009

Kaasuverkosto. Gasum Oy. Saatavissa:

<http://www.gasum.fi/TIETOAMAAKAASUSTA/KAASUVERKOSTOT/Sivut/etusivu.aspx> [viitattu 7.9.2010]

Karhunen, J., Pouri, R. & Santala, J. 2008. Kuljetukset ja varastointi - järjestelmät, kalusto ja toimintaperiaatteet. 2. painos. Suomen logistiikkayhdistys Ry: WS Bookwell Oy.

Konsernirakenne. Gasum Oy. Saatavissa:

<http://www.gasum.fi/gasumyriyksena/yritysinfo/konsernirakenne/Sivut/etusivu.aspx>
[viitattu 25.8.2010]

Liikenteen melu ja tärinä. Valtion ympäristöhallinto. Saatavissa:

<http://www.ymparisto.fi/default.asp?contentid=139310&lan=fi#a3> [viitattu 12.11.2010]

Liikenteen päästöt. Valtion ympäristöhallinto. Saatavissa:

<http://www.ymparisto.fi/default.asp?contentid=196129&lan=FI> [viitattu 5.1.2011]

Maakaasu. Gasum Oy. Saatavissa:

http://www.gasum.fi/tietoamaakaasusta/mita_on_maakaasu/Sivut/Etusivu.aspx
[viitattu 1.9.2010]

Maakaasun hinnoittelu. Gasum Oy. Saatavissa:

<http://www.gasum.fi/tietoamaakaasusta/hinnoittelu/Sivut/etusivu.aspx> [viitattu 7.9.2010]

Maakaasun käyttö Suomessa. Gasum Oy. Saatavissa:

http://www.gasum.fi/tietoamaakaasusta/maakaasun_kaytto/Sivut/default.aspx [viitattu 1.9.2010]

Maakaasuputkiston rakentaminen s.8. Gasum Oy. Saatavissa:

http://www.gasum.fi/gasumyriyksena/media2/julkaisuja/Documents/Mp_rak_210x210.pdf [Viitattu 16.9.2010]

Maakaasuvarat. Gasum Oy. Saatavissa:

http://www.gasum.fi/tietoamaakaasusta/mita_on_maakaasu/Sivut/Maakaasuvarat.aspx
[viitattu 1.9.2010]

Maakaasuverkkokomponentit. Energiamarkkinavirasto. Saatavissa:

http://www.emvi.fi/files/Maakaasuverkkokomponenttien_yksikkohinnat_2011.pdf
[viitattu 5.1.2011]

Maakaasuverkosto. Gasum Oy. Saatavissa:

http://www.gasum.fi/SiteCollectionImages/Tietoa%20maakaasusta/Kaasuverkostot/2009-10_Suomen_maakaasuverkosto.jpg [viitattu 7.9.2010]

MOBE – Biokaasukonseptin kehittäminen, tekninen esiselvitys. Rejlers Oy, Gasum Oy. 2009.

MOBE-raportti. Gasum Oy. 26.10.2009.

Nesteytetty maakaasu. Saatavissa:

<http://www.oertli.fi/gasumyriyksena/media2/uutiset/2009/Sivut/Gasumtuottaajatoimitaanesteytetty%C3%A4maakaasua.aspx> [viitattu 1.11.2010]

Nuppunen, Anni. Sähköpostiviesti 17.6.2010. Gasum Oy.

Oksanen, R. 2004. Kuljetustuotannon toimintolaskenta – Kuljetustalouden perusteista moderniin toimintolaskentaan. Hyvinkää: Ekondata Oy

Riikonen, A. Nesteytetyn maakaasun rooli maailmalla kasvaa – myös Suomeen uutta tuotanto- ja kuljetuskapasiteettia. Erillispainos Maakaasuyhdistyksen vuosikirjasta 2008-2009.

Rohweder, L. 2004. Yritysvastuu – kestävä kehitys organisaatiossa. Porvoo: WSOY

Siitonen, Sari. Sähköpostiviesti 17.11.2010. Gasum Oy.

Skaffari, J. 1999. Maakaasuputken lisärakentaminen ja ympäristövaikutukset. Kunnossapito 5/1999, s. 44–46.

Suomen kaasuyhdistys, maakaasukäsikirja kuva 4.1. Saatavissa:

<http://www.maakaasu.fi/kirjat/maakaasukasikirja/maakaasuputkistot> [viitattu 20.11.2010]

Suomilammi, Ari. Kokous 17.11.2010. Kouvola: Gasum Oy.

Suomilammi, Ari. Sähköpostiviesti 27.12.2010. Gasum Oy.

Tietoa biokaasusta. Jyväskylä Innovation Oy. Saatavissa:

<http://www.biokaasufoorumi.fi/index.asp?init=1&initID=18176> [viitattu 10.9.2010]

Uusiutuva energia. Motiva Oy. Saatavissa:

http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia [viitattu 5.11.2010]

Energia Suomessa: Tekniikka, talous ja ympäristövaikutukset 2004. 3., täysin uudistettu painos. Helsinki: Edita

Yleistä maakaasun turvallisuudesta. Gasum Oy. Saatavissa:

<http://www.gasum.fi/tietoamaakaasusta/turvallisuus/Sivut/Etusivu.aspx> [viitattu 7.9.2010]

Ympäristöjärjestelmä. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. Saatavissa:

<http://www.sfs.fi/iso14000/ymparistojarjestelma/> [viitattu 2.9.2010]

Liite 1

PUTKISIIRTO - hiilijalanjälki

keltaisella merkityt solut = lähtöarvoja myös muilla sivuilla
punaisella merkityt solut = luottamuksellisia tietoja ja puuttuvat tästä versiosta

Jalostusprosessin metaanihäviöt

	Symboli	Arvo	
Käyttöaste	h	8 000	h
Raakakaasu	rk	850	nm ³ /h
Jalostettu biokaasu	jk	510	nm ³ /h
CH ₄ häviö raakakaasusta			%
CH ₄ häviö kuutiolina	V _{jalostus}		nm ³ /h
Tiheys	ρ	0,73	kg/nm ³
CH ₄ häviö kiloina		-	kg/h
CH ₄ häviö vuodessa		-	kg/a
CH ₄ häviö jalostettua biokaasukuutiota kohden		0,0000	kg/nm ³
Muuntokerroin CH ₄ -> CO ₂	m	25	
CH₄ häviöiden hiilijalanjälki jalostettua biokaasukuutiota kohden	CO₂_{jalostus}	0,0	gCO₂/nm³

Jalostuslaitoksen lämmönkäyttö

Lämmön tarve	I _{prosessi}		kWh/nm ³ raakakaasu
Lämpöarvo (maakaasu)	lhv	36,04	MJ/nm ³
Lämpöarvo (maakaasu)	lhv ₁	10,01	kWh/nm ³
Päästökerroin (maakaasu)	pk _{kaasu}	55,06	gCO ₂ /MJ
- kattilan hyötysuhde	η	92 %	
Hiilidioksidimäärä tunnissa		-	gCO ₂ /h
Lämmönkäytön hiilijalanjälki jalostettua biokaasukuutiota kohden	CO₂_{lämpö}	0,0	gCO₂/nm³

Jalostuslaitoksen ja kompressorin sähkönkäyttö

Sähkön ominaishiilidioksidipäästö	pk _{sähkö}	217,8	gCO ₂ /kWh
Jalostuslaitoksen sähköntarve	S _{prosessi}		kWh/nm ³ raakakaasu
Komprimoinnin sähköntarve (oletus imupaine 4bar, purkupaine 40bar)	S _{kompressori}		kWh/nm ³ jalostettu kaasu
Sähkönkäytön hiilijalanjälki jalostettua biokaasukuutiota kohden	CO₂_{sähkö}	-	gCO₂/nm³

KOKO KETJUN HIILIJALANJÄLKI

Biokaasun lämpöarvo		35	MJ/nm ³
Hiilidioksidipäästö energiasisältöä kohden		0,00	gCO ₂ /MJ

Liite 2 (2/1)

NESTEYTYTTY SIIRTO

keltaisella merkityt solut =
lähtöarvoja myös muilla sivuilla
punaisella merkityt solut = luottamuksellisia tietoja
ja puuttuvat tästä versiosta

<i>Jalostusprosessin metaanihäviöt</i>	<i>Symboli</i>	Arvo	
Käyttöaste	h	8 000	h
Raakakaasu	rk	850	m ³ /h
Jalostettu biokaasu kaasumaisena	jk	510	m ³ /h
Jalostettu biokaasu nestemäisenä		0,85	m ³ /h
CH4 häviö (oletus)			%
CH4 häviö kuutioina	V _{kryo}		m ³ /h
Tiheys	ρ	0,73	kg/m ³
CH4 häviö kiloina		0,000	kg/h
CH4 häviö vuodessa		0	kg/a
CH4 häviö jalostettua biokaasukuutiota kohden		0,00000	kg/m ³
Muuntokerroin CH4 -> CO2	m	25	
CH4 häviöiden hiilijalanjälki jalostettua kaasumaista biokaasukuutiota kohden	CO₂_{kryo}	0,0	gCO₂/m³
BOIL-OFF metaanihäviöt koko ketjun matkalta			
1m ³ LBG muutettuna kaasumaisiksi kuutioiksi		600	m ³
Jalostuslaitoksen säiliön boil-off / vuorokausi		0,12	%
Kuljetuksen aikainen boil-off / vuorokausi		0,12	%
Keskitetyn syöttöpisteen säiliön boil-off / vuorokausi		0,12	%
Varastosäiliössä on keskimäärin vuoden aikana jalostettua LBG:tä (säiliökoko 100m ³ , täyttöaste 90%, oletetaan, että säiliö on keskimäärin aina puolillaan)	V ₁ /2	45	m ³
Kuljetussäiliössä on keskimäärin vuoden aikana jalostettua LBG:tä (säiliökoko 50,4 m ³ , oletetaan, että säiliö on keskimäärin aina puolillaan)	V ₂ /2	25,2	m ³
Boil-off nestemäisinä kuutioina vuodessa yhdestä vaiheesta		19,71	m ³
Boil-off nestemäisinä kuutioina vuodessa koko ketjusta		50,5	m ³
Boil-off kaasumaisina kuutioina vuodessa yhdestä vaiheesta		11 826	m ³
Boil-off kaasumaisina kuutioina vuodessa koko ketjusta	BOG _{yhteensä}	30 275	nm ³ /a
Boil-off vuodessa		22 100	kg
LBG määrä vuodessa		6 800	m ³ /a
LBG määrä vuodessa netto		6 750	m ³ /a
Jalostettu biokaasu kaasumaisena vuodessa netto		4 049 725	nm ³ /a
Jalostettu biokaasumäärä ketjun lopussa kaasumaisena (poistettu boil-off)		506	nm ³ /h
Boil-off CH4 häviöiden hiilijalanjälki kaasumaista biokaasukuutiota kohden	CO₂_{BOG}	136,4	gCO₂/nm³

Liite 2 (2/2)

Koko ketjun sähkönkäyttö

Sähkön ominaishiilidioksidipäästö	$p_{k_{sähkö}}$	217,8	gCO_2/kWh
Jalostuslaitoksen sähköntarve	S_{kryo}		kWh/nm^3
Auton jäähtymisen ja pumppauksen sähköntarve (Pumppu 11kW, kesto 0,75h)	S_{auto1}		kWh/nm^3 jalostettu kaasua
Pumppaus autosta säiliöön sähköntarve (Pumppu 30kW, purkuaika 1,5h)	S_{auto2}		kWh/nm^3 jalostettu kaasua
Keskitetyn syöttöpisteen sähköntarve (Pumppu 25kW, Lämmitin 30kW)	S_{auto3}		kWh/nm^3 jalostettu kaasua
Keskitetyn syöttöpisteen kompressorin sähkönkulutus	$S_{kompressori}$		kWh/nm^3 jalostettu kaasua
Sähköntarve tunnissa yhteensä	-		kWh/h
Sähköntarve jalostettua kaasumaista biokaasukuutiota kohden		0,00	kWh/nm^3
Sähkönkäytön hiilijalanjälki jalostettua biokaasukuutiota kohden		0,0	gCO_2/nm^3

HIILIJALANJÄLKI ILMAN KULJETUKSEN OSUUTTA**136,4 gCO_2/nm^3** **Autokuljetus**

Auton kulutus / 100 km		38	$l/100km$
Auton kulutus / km	f_{auto}	0,38	l/km
Dieselin lämpöarvo	lhv_{diesel}	43	MJ/kg
Dieselin tiheys	ρ_{diesel}	0,845	kg/l
Dieselin ominaispäästökerroin	$p_{k_{diesel}}$	73,6	gCO_2/MJ
Auton ominasenergiankulutus / km		13,8	MJ / km
CO_2 määrä / km		1	
		016,2	gCO_2/km
LBG auton säiliössä yhdessä kuormassa	V_2	50,4	m^3
Kaasumainen määrä säiliössä yhdessä kuormassa		30 240	nm^3
Kuljetuksen hiilijalanjälki kaasumaista kuutiota kohden 1 km ajomatalla	$CO_{2_{auto}}$	0,03	$g CO_2 / nm^3 km$

Liite 3 (3/1)

PUTKISIIRTO KUSTANNUKSET

punaisella merkityt solut = luottamuksellisia tietoja ja puuttuvat tästä versiosta

	Symboli	Arvo	
Käyttöaste	h	8000 h	
Raakakaasu	rk	850 nm ³ /h	
Jalostettu biokaasu	jk	510 nm ³ /h	
Maakaasun kokonaishinta	mk _{hinta}	30 €/MWh	
Sähkön hinta (sis. siirron)	s _{hinta}	70 €/MWh	
Jalostuslaitos			
Investointikustannus jalostusprosessi	k _{uppreidaus}		
Jalostusprosessin sähkönkulutus	s _{prosessi}		kWh/nm ³ raakakaasu
Käytetty sähkömäärä	S _{prosessi}	-	kWh
Sähkökustannus	K ₂	- €	
Jalostusprosessin lämmönkulutus	l _{prosessi}		kWh/nm ³ raakakaasu
Käytetty lämpömäärä	L _{prosessi}	-	kWh
Lämpökustannus	K ₃	- €	
Lämmön hinta	l _{hinta}	27,6 €/MWh	
- kattilan hyötysuhde	η	92 %	
Käyttökustannukset jalostusprosessi (sis. käyttöhyödykkeet, kulutushyödykkeet, varaosat, huoltotyöt)	K ₁		€/a
Laitosrakenteet, suunnittelu, kattila	k _{laitos}		
Kromatogarfien lukumäärä		2	
Kromatografi			
Komprimointi			
Kompressori	k _{kompressori}		
Sähkönkulutus	s _{kompressori}		kWh/nm ³ jalostettu kaasu
Käyttökustannus (Oletus 5 % investoinnista)	K ₅		€/a
Komprimoinnin sähkön hinta	K ₄	-	€/a
Putkisiirron matka			
Putken rakennus (2,5km)	k _{putki/km}	450 000	€/km
Putken investointikustannus	k _{putki}		
2 kromatografia siirtoverkkoon	k _{kromatografi}	-	€
Kokonaisinvestointi			
	K ₀	-	€
Kokonaiskäyttökustannus			
	kk _{putki}	0	€/a
Pääomakulu vuodessa			
	k	0 €	0 €
			0 €

Liite 3 (3/2)

Pitoaika	n	15 vuotta		
Korko	i	8 %	10 %	12 %
Kokonaiskustannus vuodessa		0 €	0 €	0 €
Kokonaiskustannus jalostettua biokaasukuutiota kohden	K_{putki} OK_{putki}	- €/nm ³	- €/nm ³	- €/nm ³
Kustannus energiasisältöä kohden		- €/MJ		

Liite 4 (4/1)

punaisella merkityt solut = luottamuksellisia tietoja ja puuttuvat tästä versiosta

NESTEYTETYN SIIRRON KUSTANNUKSET

	Symboli	Arvo		
Käyttöaste	h	8 000 h		
Raakakaasu	rk	850 nm ³ /h		
Jalostettu biokaasu	jk	510 nm ³ /h		
Maakaasun kokonaishinta	mk _{hinta}	30 €/MWh		
Sähkön hinta (sis. siirron)	S _{hinta}	70 €/MWh		
Jalostuslaitos				
Investointikustannus jalostusprosessi (sis. LBG säiliön)	k _{kryo}		€	
Jalostusprosessin sähkönkulutus	S _{kryo}		kWh/nm ³ raakakaasu	
Käytetty sähkömäärä	S _{kryo}	-	kWh	
Sähkökustannus	K ₂	-	€	
Laitosrakenteet, suunnittelu	k _{kryolaitos}			
Kromatografi + näytteenotto höyrystin	k _{kryokromatografi}			
Autosiirto				
Kuljetuskustannus	K ₃	-	€/a	
Keskitetty syöttöpiste				
Syöttölaitosinvestointi	k _{syöttö}			
Kompressori	k _{kompressori}			
Sähkönkulutus	S _{kompressori}		kWh/nm ³ jalostettu kaasu	
Komprimoinnin sähkön hinta	K ₄	-	€/a	
Kompressorin käyttökustannus (Oletus 5 % investoinnista)	K ₅	-	€/a	
Jalostuslaitoksen + keskitetyn syöttö pisteen käyttökustannus (sisältää käyttöhyödykkeet, kulutushyödykkeet, varaosat, huoltotyön, oletus 3 % investoinnista)	K ₁	-	€/a	- €
Nesteytetyn biokaasun hävikki				
Boil-off kaasumaisina kuutioina vuodessa koko ketjusta	BOG _{yhhteensä}	50,5 m ³ /a		
Nesteytetyn biokaasun lämpöarvo		13,7 MWh/t		
Nesteytetyn biokaasun hinta			€/MWh	
Boil-off kaasun kustannus	K ₆	-	€/a	
Kokonaisinvestointi				
Kokonaiskäyttökustannus vuodessa	k _{kryo}	-	€/a	
Pääomakulu vuodessa	k	0 €	0 €	0 €
Pitoaika	n	15 vuotta		
Korko	i	8 %	10 %	12 %

Liite 4 (4/2)

Kokonaiskustannus vuodessa	K_{kryo}	- €	- €	- €
Kokonaiskustannus jalostettua biokaasukuutiota kohden	OK_{kryo}	0,00 €/nm ³	0,00 €/nm ³	0,00 €/nm ³
 Kustannus energiasäilytystä kohden		0,000 €/MJ		

Liite 5

NESTEYTETYN BIOKAASUN KULJETUSKUSTANNUS

punaisella merkityt solut = luottamuksellisia tietoja ja puuttuvat tästä versiosta

	Symboli	Arvo			
Perushinta per kuorma (sis. 2h täyttö ja 2 purku)	k_{perus}		Säiliöllisiä vuodessa	n_{lastit}	83 kpl
Kilometriveloituis	k_{km}	€/km	Säiliöllisiä vuodessa huomioiden kuljetussäiliön koko		148 kpl
Sunnuntaillisä	$k_{\text{sunnuntai}}$	€/h	Säiliön nettokoko	V_1	90 m ³
Huoltokustannus	k_{huolto}	€/km	Tuotanto nestemäisenä biokaasuna		0,85 m ³ /h
Peräkärryn investointi	K_0		Täyttöaika per säiliöllinen		106 h
Pääomakulu peräkärystä	k	0 €	Kuljetussäiliön koko	V_2	50,4 m ³
Pitoaika	n	15 vuotta	Tankkauksia sunnuntaipäivisin vuodessa	$n_{\text{sunnuntai}}$	21,1 kpl
Korko	i	8 %	Varastosäiliölliseen tarvitaan kuljetuksia		1,79 kpl
Pääomakulu per käynti		0 €			
Kuljetuksen hinta sunnuntait huomioiden		0 €			
Kuljetuksen perukulus per käynti		0 €			
Kuljetuksen peruskulu/vuosi		- €/a			
Kuljetusmatka	d	25 km			
- edestakaisin		50 km			
Kuljetuskustannus/kerta		- €			
Kulejtuskustannus /vuosi		- €/a			
Huoltokustannus per vuosi/minimi	$k_{\text{minihuolto}}$	€/a	(vasta kun edestakainen ajomatka on yli 450 km, huoltokustannukset ylittävät minimirajan)		
Kuljetusten kokonaiskustannus/vuosi	K_3	- €/a			
Kuljestuskustannus per jalostettu biokaasukuutio		0,000 €/nm ³			

Liite 6

ENERGIANKULUTUSVERTAILU

punaisella merkityt solut = luottamuksellisia tietoja ja puuttuvat tästä versiosta

Putkisiirron energiankulutus

CH4 häviöiden hiilijalanjälki jalostettua biokaasukuutiota kohden	CO2jalostus	0,00	gCO ₂ /nm ³ jalostettua biokaasua
Muuntokerroin CH4 -> CO2	m	25	
CH4 häviömäärä		0,0000	kg/nm ³ jalostettua biokaasua
Tiheys	ρ	0,73	kg/nm ³
CH4 häviömäärä		0,000	nm ³ /m ³ jalostettua biokaasua
CH4 häviön energiamäärä	E _{jalostus}	0,000	kWh/nm ³ jalostettua biokaasua
Lämmönkäytön hiilijalanjälki jalostettua biokaasukuutiota kohden	CO2lämpö	0,00	gCO ₂ /nm ³ jalostettua biokaasua
Päästökerroin (maakaasu)	pkkaasu	55,06	gCO ₂ /MJ
Lämpöarvo (maakaasu)	lhv ₁	10,01	kWh/nm ³
Lämpöarvo (maakaasu)	lhv	36,04	MJ/nm ³
Lämmön energiamäärä		0,000	MJ/nm ³ jalostettua biokaasua
Lämmön energiamäärä		0,000	nm ³ /m ³ jalostettua biokaasua
Lämmön energiamäärä	E _{lämpö}	0,000	kWh/nm ³ jalostettua biokaasua
Sähkönkäytön hiilijalanjälki jalostettua biokaasukuutiota kohden	CO2sähkö	0,0	gCO ₂ /nm ³
Sähkön ominaishiilidioksidipäästö	pk sähkö	217,8	gCO ₂ /kWh
Sähkön energiamäärä	E _{sähkö}	0,000	kWh/nm ³ jalostettua biokaasua
Energiankulutus yhteensä	E _{putki}	0,000	kWh/nm ³ jalostettua biokaasua

Nesteytetyn siirron energian kulutus

CH4 häviöiden hiilijalanjälki jalostettua kaasumaista biokaasukuutiota kohden	CO2kryo	0,00	gCO ₂ /nm ³ jalostettua biokaasua
Muuntokerroin CH4 -> CO2	m	25	
CH4 häviömäärä		0,0000	kg/nm ³ jalostettua biokaasua
Tiheys	ρ	0,73	kg/nm ³
CH4 häviömäärä		0,000	nm ³ /m ³ jalostettua biokaasua
CH4 häviön energiamäärä	E _{kryo}	0,000	kWh/nm ³ jalostettua biokaasua
Boil-off CH4 häviöiden hiilijalanjälki kaasumaista biokaasukuutiota kohden	CO2BOG	136,4	gCO ₂ /nm ³ jalostettua biokaasua
BOG häviöiden energiamäärä	E _{BOG}	0,075	kWh/nm ³ jalostettua biokaasua
Sähkönkäytön hiilijalanjälki jalostettua biokaasukuutiota kohden		0,0	gCO ₂ /nm ³ jalostettua biokaasua
Sähkön energiamäärä	E _{kryosähkö}	0,000	kWh/nm ³ jalostettua biokaasua
Kuljetuksen hiilijalanjälki kaasumaista kuutiota kohden 1km ajomatalla	CO2auto	0,067	gCO ₂ /nm ³ jalostettua biokaasua, km
Dieselin ominaispäästökerroin	pkdiesel	73,6	gCO ₂ /MJ
Dieselin energiankulutus		0,0009	MJ/nm ³ jalostettua biokaasua, km