

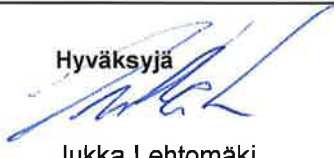


Biometaanin välivarastointi ja varastointi ajoneuvossa - Tulevaisuuden mahdollisuudet

Kirjoittajat: Petri Söderena, Marjut Suomalainen, Tuula Kajolinna ja Kristian Melin

Luottamuksellisuus: Julkinen

Raportin nimi		
Biometaanin välivarastointi ja varastointi ajoneuvossa - Tulevaisuuden mahdollisuudet		
Asiakkaan nimi	Asiakkaan viite	
Business Finland, AGCO Power Oy, Doranova Oy, Dinex Oy, Jepuan Biokaasu Oy, Valtra Oy ja Vilakone Oy		
Projektin nimi	Projektin numero/lyhytnimi	
BioMet2020	118625-1.2	
Raportin laatija(t)	Sivujen/liitesivujen lukumäärä	
Petri Söderena, Marjut Suomalainen, Tuula Kajolinna ja Kristian Melin	55/4	
Avainsanat	Raportin numero	
Biokaasu, biometaanin, ANG, CNG, LNG, CBG, LBG	VTT-R-06978-18	
Tiivistelmä		
<p>Teknillinen tutkimuskeskus VTT Oy toteuttaa vuosina 2018 - 2020 BioMet2020 projektia joka on Business Finlandin, AGCO Power Oy, Doranova Oy, Dinex Oy, Jepuan Biokaasu Oy, Valtra Oy sekä Vilakone Oy sekä VTT Oy rahoittama julkinen tutkimusprojekti, jossa tavoitteena on edistää biometaanin hyödyntämistä ajoneuvoissa ja erityisesti työkoneissa suorittamalla tutkimusta kolmella osa-alueella:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Ejektoriteknologiaan perustuva uusi biokaasun puhdistuskonseptin tutkimus 2. Biometaanin välivarastointi ja varastointi ajoneuvossa - Tulevaisuuden mahdollisuudet selvitys 3. Esisekoittunut dual-fuel metaani-diesel työkone moottoritutkimus <p>Selvityksen tavoitteena oli luoda katsaus biokaasun ja biometaanin säilönnän lainsäädäntöön sekä esitellä state-of-the-art säilöntäteknologiat ja esitellä teknologia mahdollisuuksia biometaanin säilöntään tulevaisuudessa. Selvityksessä on esitetty oleelliset vaatimukset ja tarvittavat luvat varastoitaessa biometaanin ajoneuvokäyttöön. Lisäksi on käsitelty erilaisten varastointivaihtoehtojen tekniikkaa, kustannuksia ja tulevaisuuden näkymiä.</p> <p>Selvityksen perusteella voidaan todeta, että biokaasu varastoidaan ennen käyttöä tai jalostamista biometaaniksi pääosin matalapaineisena, sillä biokaasun kompressointi ei ole taloudellisesti kannattavaa. Tällä hetkellä on jo tarjolla korkeapaineisia säiliöratkaisuita joilla kasvatetaan varastoidun metaanin energiatiheyttä [MJ/l] 250 bar painetasolla luokkaa 20 - 35 % verrattuna tavalliseen lieriömäiseen CNG säiliöön. Korkeapaineisen varastoinnin (CNG/CBG) ennustetaan laskevan Euroopassa ja Pohjois-Amerikassa samalla aika ikkunalla jopa 30 - 55 % riippuen lähteestä. Nestemäisen varastoinnin (LNG) kustannusten ennustetaan laskevan Euroopassa ja Pohjois-Amerikassa vuoteen 2025 mennessä 20 - 25 % vuoden 2015 tasosta.</p> <p>ANG ratkaisuita on kehitetty erityisesti Yhdysvalloissa viimeisen 20 vuoden aikana ja tällä hetkellä parhailla materiaaleilla kuten aktiiviset hiilet ja metalliorgaaniset rungot (MOF) saavutetaan 50 (MOF) - 100 (aktiiviset hiilet) bar painetasolla sama energiasisältö kuin CNG:llä 250 bar paineella. Aktiivihiihimateriaalien osalta on tarjolla ensimmäisiä kaupallisia ANG sovelluksia ajoneuvokäyttöön. MOF materiaalien osalta teknologia ei ole vielä täysin kypsä, jotta MOF rakenteet kestäisivät ajoneuvo-olosuhteiden rasituksen. MOF rakenteet muodostavat kuitenkin tulevaisuudessa potentiaalisen materiaalivalikoiman ANG ratkaisuksi niiden hyvien metaanin sidontaominaisuuksien ja rakenteen suhteellisen vapaan muokattavuuden johdosta.</p>		
Luottamuksellisuus	Julkinen	
6.2.2019		
Laatija	Tarkastaja	Hyväksyjä
		
Petri Söderena Erikoistutkija	Päivi Aakko-Saksa Johtava tutkija	Jukka Lehtomäki Tiimipäällikkö
VTT:n yhteystiedot		
petri.soderena@vtt.fi		
Jakelu (asiakkaat ja VTT)		
Business Finland, AGCO Power Oy, Doranova Oy, Dinex Oy, Jepuan Biokaasu Oy, Valtra Oy ja Vilakone Oy sekä VTT kirjaamo		
<p>VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.</p>		

Alkusanat

Biometaanin välivarastointi ja varastointi ajoneuvossa - Tulevaisuuden mahdollisuudet selvitys on toteutettu osana Business Finlandin, AGCO Power Oy:n, Dinex Oy:n, Doranova Oy:n, Jepuan Biokaasu Oy:n, Valtra Oy:n ja Vilakone Oy:n rahoittamaa ja VTT:n toteuttamaa BioMet2020 projektia. BioMet2020 projektin muina työpaketteina ovat uuden biokaasun puhdistuskonseptin tutkimus sekä esisekoittuneen dual-fuel metaani-diesel työkonemoottorin tutkimus. Selvityksen tavoitteena on tuottaa suomalaisten työkonevalmistajien, biokaasuntuottajien, biokaasuntuotantolaitteita ja varastointivälineitä valmistavien yritysten tarpeisiin katsaus biokaasun ja biometaanin säilönnän mahdollisuuksista ja teknologioista tulevaisuuden ajoneuvoissa sekä välivarastoinnissa lähtien liikkeelle state-of-the-art tilanteesta.

Selvityksessä muodostetaan näkemys mahdollisista säilönnän kehityssuunnista ja käytettävistä teknologioista, joilla voidaan kasvattaa biometaanin säilöntäkapasiteettia sekä välivarastoissa että ajoneuvoissa. Tarkastelussa on tuotu esille eri menetelmien kustannusvaikutuksia sekä kustannusten kehitystä tulevaisuudessa.

Selvityksen aikana käytiin vuoropuhelua BioMet2020 projektiin osallistuvien yritysten kanssa tämän hetken biokaasun säilöntään liittyvistä haasteista ja näkemyksistä yleisesti. Selvityksessä pyritään erityisesti tuottamaan tietoa ja kuvaamaan tulevaisuuden mahdollisuuksia joilla yritysten esittämiä haasteita olisi mahdollista ratkoa.

Espoo 6.2.2019

Tekijät

Sisällysluettelo

Alkusanat	2
Sisällysluettelo	3
Lyhenteet	4
1. Johdanto.....	5
2. Biokaasun varastointia koskeva lainsäädäntö.....	7
2.1 Kaasun välivarastointi.....	7
2.1.1 Paineistetun ja nesteytetyn metaanin säiliöiden materiaalin valinta ja tekninen suunnittelu	8
2.1.2 Käsittelyn ja varastoinnin lupamenettelyyn liittyvät asiat.....	8
2.1.3 Rakentamisluvan teknisiä rajoja.....	9
2.2 Tankkausasemien vaatimukset.....	11
2.2.1 Tekniset vaatimukset kansainvälisesti.....	12
2.2.2 Vaatimukset Suomessa	15
2.3 Kaasun varastointi ajoneuvoissa.....	17
3. Nykyinen varastointiteknologia.....	19
3.1 Biokaasun ja biometaanin välivarastointi	20
3.1.1 Varastointi kaasufaasissa	21
3.1.2 Varastointi nestefaasissa	27
3.1.3 Tankkaus	30
3.2 Biometaanin varastointi ajoneuvoissa	34
3.2.1 Nestemäisen metaanin säilöntäratkaisut.....	34
3.2.2 Kaasumaisen metaanin säilöntäratkaisut	34
4. Tulevaisuuden varastointiteknologiamahdollisuuksia	38
4.1 Huokoiset orgaaniset polymeerit (POP)	40
4.2 Metalliorgaaniset rungot (MOF)	41
4.3 Aktiiviset hiilirakenteet	42
4.4 Metaanihydraatit	43
4.5 Varastointi ajoneuvoissa.....	44
4.6 Tulevaisuuden näkymä.....	47
5. Yhteenveto	48
Lähdeviitteet.....	53
Liite 1: Yrityksille esitetyt kysymykset ja niiden vastaukset	56

Lyhenteet

ANG = maakaasun varastointi huokoisen materiaaliin pinnalle (Adsorbed Natural Gas)

BG = biogas

BOG = boil-off gas

CBG = paineistettu biokaasu (compressed biogas)

CBM = paineistettu biometaani (compressed biomethane) -viittaa yleensä 200 bar tai 250 bar paineeseessa olevaan bioperäiseen metaaniin

CNG = paineistettu maakaasu (compressed natural gas)

COF = kovalenttinen orgaaninen rakenne (covalentic organic framework)

DC = double containment

EU = Euroopan Unioni

FC = full containment

HRA = home refuelling appliance

LAG = neste avusteinen hienonta menetelmä (liquid assisted grinding method)

LNG = nesteytetty maakaasu (liquified natural gas)

LBM = nesteytetty biometaani (liquified biomethane)

MOF = huokoinen metalli-orgaaninen rakenne (metal-organic framework)

NG = natural gas

POP = huokoinen orgaaninen polymeeri (porous organic polymer)

SC = single containment

VRA = vehicle refuelling appliance

1. Johdanto

EU:n ilmastostrategia asettaa sekä lähitulevaisuudessa, että pitkällä aikavälillä voimakkaat tavoitteet hiilidioksidipäästöjen leikkaamiseksi ja uusiutuvan energian käytölle. EU:n jäsenmaat ovat sitoutuneet leikkaamaan EU alueen hiilidioksidipäästöjä vuoteen 2030 mennessä vähintään 40 %:a vuoden 1990 tasosta. Ehdotuksen mukaan Suomea koskeva päästövähennystavoite olisi 39 %:a vuoden 2005 tasosta. Lisäksi EU:n vuoteen 2030 ulottuvassa ilmastostrategiassa tavoitteena on 27 % uusiutuvan energian osuus käytetystä energiasta. Vuonna 2016 tehdyn ja vuoteen 2030 ulottuvan Suomen kansallinen energia ja ilmastostrategia asettaa kansalliseksi tavoitteeksi 2020-luvun aikana uusiutuvien energialähteiden käytön kasvattamisen yli 50 % suhteessa kokonaisenergian käyttöön¹.

Asetettujen ilmastostrategioiden tavoitteisiin pääsemiseksi laaja-alainen uusiutuvien energianlähteiden hyödyntäminen ja kiertotalouden edistäminen ovat avainasemassa niin kansallisella kuin kansainvälisellä tasolla. Tämä avaa Suomen kaltaiselle korkean teknologian maalle kansainvälisesti merkittäviä liiketoimintamahdollisuuksia. Erityisesti maatalouden piirissä on suuri määrä jätevirroissa hyödyntämätöntä raaka-ainepotentiaali niin energia kuin jatkojaloste käyttöä ajatellen. Maatalouden ja yhdyskuntajätevirtojen hyödyntäminen biokaasun tuotantoon muodostaa tulevaisuudessa merkittävän potentiaalin edistää kiertotaloutta, luoda uutta liiketoimintaa kansainvälisesti, parantaa Suomen energiaomavaraisuutta sekä parantaa maatilojen omavaraisuutta ja kilpailukykyä niin kansallisesti kuin kansainvälisesti.

Biokaasun käytön lisäämisen kannalta välivarastointi ja varastointiratkaisut ajoneuvossa ovat yhtenä merkittävänä tekijänä. Tällä hetkellä esimerkiksi paineistetun biometaanin diesel energiaekvivalentti tilavuus on noin 4-5 kertaa suurempi riippuen käytetäänkö 200 vai 250 bar varastointipainetta. BioMet2020-projektissa selvitetään säilönnän tulevaisuuden kehitysnäkymät ja polut lähtien liikkeelle tämän hetken state-of-the-art ratkaisusta. Tavoitteena on siis kartoittaa mahdollisia ratkaisuja, joilla esimerkiksi juuri välivarastoinnissa ja ajoneuvokäytössä paineistetun biometaanin energiatiheyttä tilavuusyksikköä kohti voitisiin kasvattaa. Lisäksi selvityksessä tuodaan esille eri säilöntäteknologioiden kustannusten kehittymistä lähitulevaisuudessa.

Selvityksellä tuotetaan suomalaisten yritysten tutkimus ja kehitystoiminnan tueksi katsaus siitä minkä tyyppiset biokaasunsäilöntäratkaisut tulevaisuudessa voisivat olla potentiaalisia ja mihin suuntaan tekninen kehitys biokaasun säilönnässä voisi mennä.

Selvityksen aikana BioMet2020-projektiin osallistuneet yritykset vastasivat kysymyksiin koskien heidän kokemuksia ja näkemystä biometaanin käytöstä ja sen tämän hetkisistä haasteista. Alla on lueteltuna tiivistetysti yritysten näkemä yleiseinen tilannekuva sekä heidän näkemät haasteet ja kehityskohteet:

- Biokaasun tuottaminen, jalostaminen biometaaniksi ja sen käyttö lisääntymässä niin maatalouskäytössä kuin tieliikenteessä.
- Traktori/työkonekäytössä luokan 4 paineistetun metaanin säiliöitä. Välivarastoinnissa paineistetun metaanin teräspullokontteja (250 bar).
- Biometaanin nesteytyksen yleistymistä hidastaa tällä hetkellä nesteytyksen tuotantokustannukset. Nesteytyksen tuotantokustannuksia nostaa erityisesti

¹ Valtioneuvosto, Valtioneuvoston selonteko kansallisesta energia- ja ilmastostrategiasta vuoteen 2030

http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/79189/TEMjul_4_2017_verkkojulkaisu.pdf?sequence=1&isAllowed=y

biometaanilta vaadittava korkea puhtausaste. Biometaanin paineistetun välivarastoinnisen yleistymisen esteenä nähdään painesäiliöiden hinta.

- Työkonekäytössä terässäiliöt tarjoaisivat edullisen säilöntäratkaisun, mutta eivät tällä hetkellä sovellu käyttöön huonon korroosiokestävyyden vuoksi. Lisäksi Valtran kokemuksen perusteella ajoneuvoissa paineistetun kaasun energiatiheys tilavuusyksikköä kohden verrattuna dieseliin voi olla huomattavasti matalampi kuin 1:5 (200 bar).
- Biometaanin varastointiratkaisuille yleisesti tärkeiksi ominaisuuksiksi mainittiin hinnan lisäksi käytön ja logistiikan turvallisuus, kestävyys, robustisuus sekä säiliöjärjestelmien käytettävyys.
- Yleisesti suurimpana esteenä biometaanin käytön laajentumiselle polttoaineena nähtiin säilöntäratkaisujen tämän hetken kustannustasoa sekä matalaa energiatihyettä [MJ/l] suhteessa dieseliin. Tarvitaan uusia ratkaisuja joilla energiatihyettä [MJ/l] on mahdollista kasvattaa sekä välivarastoinnissa että ajoneuvovarastoinnissa.

Selvityksen laatimisessa pyrittiin etsimään vastauksia yritysten esittämiin näkemyksiin ja haasteisiin tuomalla esille eri säilöntäteknologioita sekä katsaus alan viimeisimmistä kehityspoluista. Selvitykseen pyrittiin etsimään mahdollisimman kattava joukko uusimpia metaanin säilöntäteknologioita tarjoavia yrityksiä. Yrityksiltä kysytyt kysymykset ja niiden vastaukset löytyvät Liite 1: Yrityksille esitetyt kysymykset ja niiden vastaukset.

2. Biokaasun varastointia koskeva lainsäädäntö

Maakaasun käsittelyyn ja varastointiin on Euroopan taseisia käsittelyvaatimuksia ja niiden lisäksi on maakohtaisia asetuksia sekä maakohtaisia soveltamisohjeita. Tässä kappaleessa esitetään oleellimmat lainsäädännöt ja ohjeistukset koskien biokaasu/metaanilaitteistoja, varastointia käyttökohteen lähellä ja ajoneuvoissa. Myös nesteytettyyn metaaniin liittyvät vaatimukset on huomioitu.

Lainsäädännöllisissä teksteissä pääsääntöisesti rinnastetaan maakaasu, biometaani ja biokaasu toisiinsa. Turvatekniikan keskuksen muistion mukaan biokaasu rinnastetaan hallinnollisten vaatimusten osalta maakaasuksi, jos sen metaanipitoisuus on 80 % tai enemmän, jolloin puhutaan biometaanista tai jalostetusta biokaasusta [1].

2.1 Kaasun välivarastointi

Euroopan laajuista lainsäädäntöä ovat seuraavat direktiivit ja asetukset:

- Laitteistovaatimukseen liittyen: Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EU) 2016/426 kaasumaisia polttoaineita polttavista laitteista sekä painelaitedirektiivi 2014/68/EU
- Luvituksiin liittyen: Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2012/18/EU vaarallisista aineista aiheutuvien suuronnnettomuusvaarojen torjunnasta.
- Maakaasun varastointiin liittyen: SFS-EN 13645 Nesteytetyn maakaasun laitteistot ja asennukset. Maalla olevien laitteistojen suunnittelu. Varastointikapasiteetti 5 - 200 tonnia.
- Maakaasun varastointiin liittyen: SFS-EN 1473 Nesteytetyn maakaasun laitteistot ja asennukset. Maalla olevien laitteistojen suunnittelu.
- Jakeluun liittyen: Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2014/94/EU vaihtoehtoisten polttoaineiden infrastruktuurin käyttöönotosta.

Suomen lainsäädäntö:

- Laki vaarallisten kemikaalien ja räjähteiden käsittelyn turvallisuudesta 390/2005. Lain tarkoituksena on ehkäistä ja torjua vaarallisten kemikaalien sekä räjähteiden valmistuksesta, käytöstä, siirrosta, varastoinnista, säilytyksestä ja muusta käsittelystä aiheutuvia henkilö-, ympäristö- ja omaisuusvahinkoja. Lain tarkoituksena on lisäksi edistää yleistä turvallisuutta.
- Maakaasuasetus 1058/1993, asetus koskee maakaasun varastointia ja teknistä käyttöä sekä maakaasun siirtoon, jakeluun ja käyttöön tarkoitettuja putkistoja ja laitteita.
- Valtioneuvoston asetus maakaasun käsittelyn turvallisuudesta 551/2009, säädetty lain 390/2005 nojalla. Asetuksessa säädetään maakaasun varastoinnista ja teknisestä käytöstä sekä maakaasun siirtoon, jakeluun, käyttöön ja ajoneuvojen tankkaukseen tarkoitettuista putkistoista ja laitteistoista. Tätä asetusta sovelletaan myös biokaasun tekniseen käyttöön sekä biokaasun talteenottoon, siirtoon, jakeluun ja käyttöön tarkoitettuihin putkistoihin ja laitteistoihin.
- Painelaitelaissa 869/1999 säädetään maakaasun käyttöputkiston ja tankkausaseman putkiston, niihin liittyvien laitteiden ja laitteistojen rakennevaatimuksista sekä vaatimustenmukaisuuden osoittamisesta

- Kaasulaiteasetuksessa 1434/1993 säädetään kaasun käyttölaitteista. Asetuksessa säädetään mm. kaasumaisia polttoaineita käyttäviä laitteita, turva-, säätö- tai ohjauslaitteita ja oheislaitteita, jotka on suunniteltu osaksi kaasulaitetta.
- Kaasuasennuksista annetussa kauppa- ja teollisuusministeriön päätöksessä 1286/1993 säädetään kaasuasennuksista.
- Valtioneuvoston asetus vaarallisten kemikaalien käsittelyn ja varastoinnin valvonnasta 685/2015, säädetty lain 390/2005 nojalla. Asetuksessa säädetään vaarallisten kemikaalien teollisesta käsittelystä, varastoinnista ja säilytyksestä, niihin liittyvistä lupa-, ilmoitus- ja hallintomenettelyistä sekä valvonnasta. Asetusta sovelletaan maakaasun käyttöön raaka-aineena kemiallisessa prosessissa sekä sen käyttöön tuki- ja lisäpolttoaineena muiden vastaavien kaasumaisten hiilivetyjen kanssa sekä niihin liittyvään varastointiin. Asetusta sovelletaan myös biokaasun valmistukseen ja siihen välittömästi liittyvään tekniseen käyttöön ja varastointiin.
- Laki liikenteessä käytettävien vaihtoehtoisten polttoaineiden jakelusta 478/2017. Lain tarkoituksena on varmistaa, että vaihtoehtoisten polttoaineiden julkiset lataus- ja tankkauspisteet ovat yhteisten teknisten eritelmien mukaisia ja että käyttäjille annetaan riittävät tiedot vaihtoehtoista polttoaineista ja niiden jakelusta. Lailla pannaan osaltaan täytäntöön vaihtoehtoisten polttoaineiden infrastruktuurin käyttöönotosta annettu Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2014/94/EU

Suomessa Tukes on laatinut erillisen muistion biokaasun valmistukseen ja käyttöön sovellettavista säädöksistä [1].

2.1.1 Paineistetun ja nesteytetyn metaanin säiliöiden materiaalin valinta ja tekninen suunnittelu

Paineistettujen säiliöiden materiaali, mitoitus ja muu suunnittelu on standardoitu ja standardit löytyvät ryhmästä SFS 23 (fluidiryhmät ja niiden komponentit yleensä). Tämä ryhmä sisältää fluidien varastointilaitteet -alaotsikon alla mm. ISO/EN/SFS standardit eri materiaaleista valmistetuille kaasupulloille ja niiden venttiileille, sekä kryogeenisille säiliöille.

2.1.2 Käsittelyn ja varastoinnin lupamenettelyyn liittyvät asiat

Tukes-muistion (2017) [1] mukaan *jalostetulle biokaasulle* on esitetty maakaasuasetuksen (551/2009) 9 §:n mukaiset, Tukesille tehtävän ilmoituksen ja rakentamislupahakemuksen rajat sekä Seveso-direktiivin (2012/18/EU) mukaisen toimintaperiaateasiakirjan ja turvallisuusselvityksen rajat:

- Ilmoitus Tukesille: 0,5 t
- Rakentamislupa: 5 t
- Toimintaperiaateasiakirja (MAPP): 50 t
- Toimintasuunnitelma: 200 t

Metaanipitoisuuden ollessa alle 80 % biokaasu katsotaan raakakaasuksi (puhdistamattomaksi kaasuksi) ja luparaja on kuten muillakin syttyvillä kaasuilla. Puhdistamattoman biokaasun lupamenettelyn suhdeluvun laskennassa käytetään seuraavia rajoja (valvonta-asetuksen (685/2015) liitteen 1 osan 1 mukainen kategorian P2 syttyvä kaasu):

- Ilmoitus pelastuslaitokselle: 1 t
- Rakentamislupa: 5 t
- Toimintaperiaateasiakirja (MAPP): 10 t
- Toimintasuunnitelma: 50 t

Biokaasun valmistusta ja siihen välittömästi liittyvää teknistä käyttöä ja varastointia, koskeva lupa kattaa laitoksen omalla alueella olevan reaktorin, kaasukuvun, puhdistusyksikön, komprimointiyksikön, pullokonttien täyttämisen ja kattilalaitoksella tapahtuvan kaasun polton. Vaarallisten kemikaalien määrään lasketaan kaikki laitoksen vaaralliset kemikaalit, ei vain biokaasu.

Tankkausasema vaatii Tukesin luvan maakaasuasetuksen mukaisesti. Jos tankkausta tehdään vain omaan käyttöön, voidaan tankkauspiste käsitellä em. kokonaisuuden lupakäsittelyn yhteydessä (pelastuslaitos tai Tukes).

2.1.3 Rakentamisluvan teknisiä rajoja

Tukes-ohje 7/2015 kertoo kootusti maakaasun turvallisen käsittelyn vaatimuksista ja tämä kappale on kooste kyseisestä ohjeesta.

2.1.3.1 Siirto ja jakelu

Maakaasun siirto ja jakelu (jakeluputkiston talohaara pois lukien) vaatii aina rakentamisluvan. Käyttöputkistolle vaaditaan aina rakentamislupa, kun kohteen polttoaineteho on vähintään 1,2 MW. Käyttöputkistolle ei vaadita rakentamislupaa (huomaa tehoraja aina voimassa), jos käyttöputkiston suurin sallittu käyttöpaine on enintään 0,5 baaria tai putkiston nimellissuuruus on enintään DN 25.

Rakentamislupa voi olla alueellinen, jolloin rakentamislupa kattaa jakeluputkistot (enintään 8 baarin linjoille) sekä alueluvan alueella olevat käyttökohteet, lukuun ottamatta erillisiä suuria käyttökohteita (teho vähintään 6 MW).

2.1.3.2 Käyttölupa

Tukes myöntää siirtoputkistolle käyttöluvan käyttöönottotarkastuksen perusteella.

Jakelu- ja käyttöputkistolle käyttöluvan myöntää tarkastuslaitos tekemänsä käyttöönottotarkastuksen perusteella.

Kohteet, jotka eivät vaadi rakentamislupaa, saa ottaa käyttöön asennusliikkeen annettua todistuksen asennuksen säännöstenmukaisuudesta.

2.1.3.3 Asennus ja huolto sekä koekäyttö

Asennusliikkeen tulee antaa työn teettäjälle tekemästään asennuksesta sekä muutostöistä vastuuhenkilön allekirjoittama todistus. Koekäyttö kuuluu asentamistoimintaan.

2.1.3.4 Tarkastus

Kaikille rakentamisluvan vaatineille kohteille tehdään käyttöönottotarkastus sekä joka kahdeksas vuosi määräaikaistarkastus. Tarkastuksen tekee hyväksytty tarkastuslaitos. Määräaikaistarkastuksen voi tehdä myös Tukesin erikseen hyväksymissä tapauksissa putkiston omistaja tai haltija.

Lisäksi myös kaikki käyttöputkistot ja käyttölaitteet alueluvan piirissä tarkastetaan, kun kohteen polttoaineteho on vähintään 1,2 MW.

2.1.3.5 Putkiston vastuuhenkilö eli käytön valvoja

Siirto- ja jakeluputkistolle, tankkausasemalle sekä käyttöputkistolle, johon liittyvien käyttölaitteiden polttoaineteho on yli 1,2 MW, toiminnanharjoittajan on ennen käyttöönottoa

nimettävä putkiston käytöstä vastaava henkilö (käytön valvoja), sekä tarvittaessa yksi tai useampi sijainen.

Käytön valvojan on tunnettava maakaasua koskevat säännökset, standardit ja ohjeet sekä maakaasun ominaisuudet riittävässä määrässä. Näiden tietojen tunteminen tulee osoittaa käytön valvojan kirjallisessa kokeessa, jonka järjestää Turvallisuus- ja kemikaalivirasto (Tukes). Hyväksytystä suorituksesta annetaan todistus, joka on voimassa toistaiseksi.

Ainoastaan siirtoputkiston osalta on vaatimuksena selkeä koulutusvaatimus ja työkokemus, eli opisto- tai ammattikorkeakoulutasoinen tutkinto, sekä vähintään kahden vuoden kokemus alaan perehdyttävissä tehtävissä.

2.1.3.6 Valvontakirja

Valvontakirja muodostuu putkiston rakentamiseen, laatuun ja tarkastuksiin sekä käytönaikaiseen toimintaan ja käytön valvojan merkintöihin liittyvästä aineistosta.

2.1.3.7 Räjähdyksen estäminen ja räjähdyksiltä suojautuminen

Maakaasu on palava kaasu ja se voi hallitsemattomana muodostaa räjähdyskelpoisia pitoisuuksia. Kun kohteessa arvioidaan olevan räjähdysvaara, toiminnanharjoittajan on laadittava räjähdysuojausasiakirja. Asiakirjassa tulee olla arvioinnin tulokset, tekniset ja organisatoriset suojaustoimenpiteet ja räjähdysvaarallisten tilojen luokittelu.

2.1.3.8 Toimintajärjestelmä

Toimintajärjestelmä edellytetään ainakin seuraavissa tapauksissa:

- siirtoputkiston suunnittelu, rakentaminen ja käyttö
- siirtoputkiston ja teräksisen jakeluputkiston asentaminen (asennusliikkeeltä edellytetään toimintajärjestelmää)
- toiminnanharjoittajan hakiessa oikeutta korvata määräaikaistarkastus oman organisaation tekemillä käyttö-, valvonta- ja tarkastustoimenpiteillä
- toiminnanharjoittajan hakiessa jakelu- ja käyttöputkiston alueellista rakentamislupaa.

2.1.3.9 Maakaasun varastointi

Maakaasun varastoinnille vaaditaan rakentamislupa, jos varastoitavan maakaasun määrä on vähintään 5 tonnia. Jos varastointimäärä on yli 0,2 tonnia mutta alle 5 tonnia, varastoinnista on tehtävä ilmoitus Turvallisuus- ja kemikaalivirastolle (Tukes).

Maakaasun varastoinniksi ei katsota maakaasun säilytystä maakaasuputkistoissa tai kaasupulloissa.

Maakaasun varastointilaitos on SEVESO-säännösten (2012/18/EU) mukaan toimintaperiaatelaitos, kun varastointimäärä on vähintään 50 tonnia ja turvallisuusselvityslaitos, kun varastointimäärä on vähintään 200 tonnia.

Maakaasun varastoinnille on olemassa eurooppalaiset standardit SFS-EN 13645 ja SFS-EN 1473.

Lupaa haetaan Tukesilta. Lupahakemuksessa tulee olla tiedot a) toiminnanharjoittajaa koskevat tiedot, b) yleistiedot toiminnasta ja c) varaston sijoittaminen ja siihen liittyvät liitteet.

Tukesin myönnettyä varastointiluvan ja laitoksen valmistuttua tehdään käyttöönottotarkastus. Tarkastuksen tekee Tukes. Laitos saadaan ottaa käyttöön tarkastuksen perusteella. Huom. Tukesin käyttöönottotarkastusta edeltävät tarkastuslaitoksen tekemät tekniset tarkastukset.

Pelastussuunnitelmien osalta voidaan soveltaa vaarallisten kemikaalien teollisesta käsittelystä ja varastoinnin valvonnasta annetun valtioneuvoston asetuksen (685/2015) mukaista menettelyä.

Toimintaperiaatelaitoksille tehdään määräaikaistarkastus 3 vuoden välein ja turvallisuusselvityslaitokset tarkastetaan vuosittain.

2.2 Tankkausasemien vaatimukset

Tankkausasemien lainsäädäntö liittyy pääosin aiemmin mainittuihin eurooppalaisiin säädöksiin, jotka liittyvät maakaasuun, vaarallisten kemikaalien käsittelyyn ja painelaitteisiin. Myös kansallisissa lainsäädännöissä on tankkausasemista säädelty melko yleisellä tasolla.

Tarkkoja teknisiä vaatimuksia tankkausasemille on esitetty kansainvälisissä standardisoinnissa (ISO ja EN) kaasumaiselle ja nesteytetylle metaanille. Tässä kappaleessa on esitetty oleellimmat tekniset vaatimukset ja Suomessa noudatettava käytäntö Tukesin ja Kaasuyhdistyksen (2011) ohjeistuksen mukaisesti [2].

2.2.1 Tekniset vaatimukset kansainvälisesti

Teknisiä vaatimuksia on esitetty useissa standardeissa, jotka on esitetty Taulukko 1:ssä. Koska maakaasun ja räjähtävien aineiden käsittelyyn viitataan monissa eri lainsäädännöissä, ohjeissa ja standardeissa, ei Taulukko 1 ole välttämättä täysin kattava.

Taulukko 1: Teknisiä standardeja, joissa esitetään kaasujärjestelmien teknisiä vaatimuksia. Taulukko ei ole täysin kattava.

Standardi	Kuvaus
EN 13423:2000	Compressed natural gas vehicle operations
EN ISO 16923:2018	Natural gas fuelling stations - CNG stations for fuelling vehicles (ISO 16923:2016)
EN ISO 16924:2018	Natural gas fuelling stations - LNG stations for fuelling vehicles (ISO 16924:2016)
EN 14382:2005 +A1:2009/AC:2009	Safety devices for gas pressure regulating stations and installations - Gas safety shut-off devices for inlet pressures up to 100 bar
EN 334:2005+A1:2009	Gas pressure regulators for inlet pressures up to 100 bar
EN 12007:2012, parts 1-5	Gas infrastructure - Pipelines for maximum operating pressure up to and including 16 bar
EN 12186:2014	Gas infrastructure - Gas pressure regulating stations for transmission and distribution - Functional requirements
EN 12279:2000/A1:2005	Gas supply systems - Gas pressure regulating installations on service lines - Functional requirements
EN 12583:2014	Gas Infrastructure - Compressor stations - Functional requirements
EN 15001, parts 1-2	Gas Infrastructure - Gas installation pipework with an operating pressure greater than 0,5 bar for industrial installations and greater than 5 bar for industrial and non-industrial installations
EN 1594:2013	Gas infrastructure - Pipelines for maximum operating pressure over 16 bar - Functional requirements
EN 16348:2013	Gas infrastructure - Safety Management System (SMS) for gas transmission infrastructure and Pipeline Integrity Management System (PIMS) for gas transmission pipelines - Functional requirements
EN 16726:2015 +A1:2018	Gas infrastructure - Quality of gas - Group H
EN 13645:2001	Installations and equipment for liquefied natural gas - Design of onshore installations with a storage capacity between 5 t and 200 t

EN ISO 14469:2017	Road vehicles - Compressed natural gas (CNG) refuelling connector
EN ISO 12617:2017	Road vehicles - Liquefied natural gas (LNG) refuelling connector - 3,1 MPa connector
ISO/TR 16922:2013	Natural gas - Odorization
EN 16723-2:2017	Natural gas and biomethane for use in transport and biomethane for injection in the natural gas network. Part 2: Automotive fuels specification

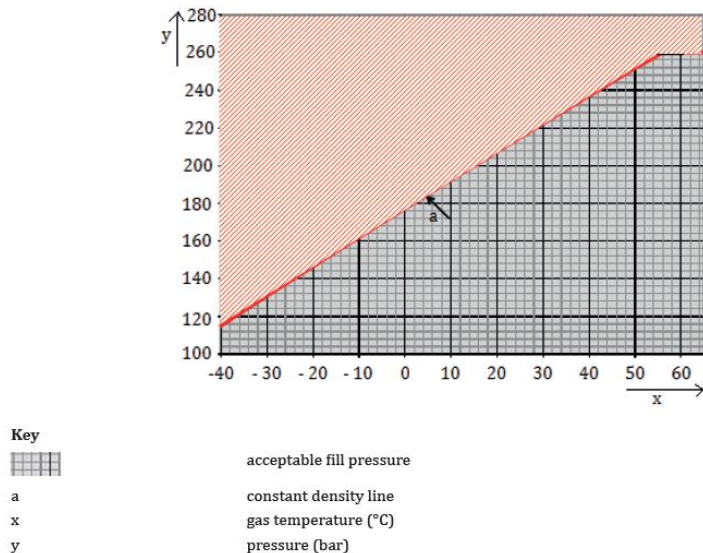
Yksityiskohtaisia tietoja edellä mainituista standardeista ja ohjeista ei ole tarpeellista toistaa, mutta seuraavissa kappaleissa on listattu suunnittelun ja käytön kannalta tärkeimpiä huomioitavia asioita.

Standardissa EN ISO 16923:2018 on paineistetun kaasun tankkausasemille määritelty seuraavia oleellisia kriteerejä ja vaatimuksia:

- Suurin sallittu täyttöpaine 20 MPa (15°C) tai 26 MPa, jos käytössä on lämpötilakompensointi (200 bar ja 260 bar, vastaavasti). Lämpötilakompensoitu täyttöpaine on esitetty Kuva 1:ssä.
- Aseman sisäiset vähimmäisetäisyydet alle 10 000 litran välivarastolliselle tankkausasemalle
 - Rakennuksen aukoista: täyttöpistoolista 3 m sekä varastokaasupulloista ja kompressorista 3 m
 - Rakennuksen palamattomat seinät: täyttöpistoolista 0 m ja sekä varastokaasupulloista ja kompressorista 1 m
 - Yleinen suoja-alue: täyttöpistoolista 5 m ja sekä varastokaasupulloista ja kompressorista 5 m
- Yli 10 000 litran välivarastollisen tankkausaseman vähimmäisetäisyys varastokaasupulloista ja kompressorista on 10 m
- Tankkauslaitteen luokse pitää olla vapaa pääsy, muiden toimintojen (varasto, kompressorit yms.) ympärillä tulee olla vähintään 1,5 m korkea palamaton suojarakennelma (esim. aita tai seinä).
- Varoventtiili asennettu vähintään 3 m korkeudelle maanpinnasta tai 1 m korkeammalle kuin korkein rakennuksen kohta viiden metrin säteellä
- Kaasun syötön laitevaatimukset putkistoa pitkin tulevalle kaasulle ja siirrettävälle varastoinnille
- Kompressorin asennusmahdollisuudet, turvaetäisyydet asennuksittain ja vaara-alueen määritelmät ja etäisyydet
 - kompressoreilla tyypillisesti 1 m
 - matalapaine/välitankin (buffer storage) vaara-alue riippuu säiliön tilavuudesta vaihdellen välillä 2,5 - 10 m

- varoventtiilin vaara-alue riippuu venttiilin aukon koosta, ollen kuitenkin vähintään 0,5 m
- Ehdotus tankkausaseman laitteistojen huolto- ja tarkastusväleille

Lämpötilakompensoitu suurin sallittu täyttöpaine on esitetty Kuva 1:ssä.



Kuva 1: Suurin sallittu täyttöpaine lämpötilakompensoidulla tankkausasemalla. Lähde: EN ISO 16923:2018

Standardissa EN ISO 16924:2018 on nesteytetyn kaasun tankkausasemille määritelty seuraavia oleellisia kriteerejä ja vaatimuksia:

- Paineen nousun estävät varoventtiilit tai estojärjestelmät jokaisessa kohdassa linjastoa, erillisiä standardeja ja ohjeita
- Aseman sisäiset vähimmäisetäisyydet riippuvat LNG varaston säilytystavasta (maan päällä, maanalainen) ja LNG varaston kokonaistilavuudesta
- Ohjeita LNG-pumppujen toiminnasta ja asentamisvaatimuksia
- Esimerkkeinä mainittakoon kiinteän maan päälle asennetun LNG tankkausaseman vähimmäisetäisyyksiä:
 - LNG varaston täyttöpisteen etäisyys LNG varastosta: 6 m
 - Tankattavan ajoneuvon ja LNG varaston etäisyys: 4 m varaston ulkokuoresta
 - Yläpuolella kulkevat yli 600 V sähköjohdot: 10 m
 - Täyttöpistoolin ja rakennuksen etäisyys: 6 m, tai 3 m (jos varustettu ns. kuolleen miehen kytkimellä)
 - LNG varastojen välinen etäisyys: 1,5 m
- Esimerkkeinä mainittakoon kiinteän maan alle asennetun LNG tankkausaseman vähimmäisetäisyyksiä:
 - Maan alle asennetun säiliön eristykset tulee ottaa huomioon ja siten ne voivat kasvattaa vähimmäisetäisyyksiä

- Maanalaisten LNG varastojen välinen etäisyys: 4,5 m
- Alle 10 m³:n (ns. vesitilavuus) LNG varaston ja rakennusten välinen etäisyys: 4,5 m
- 10-120 m³ LNG varaston ja rakennusten välinen etäisyys: 7,5 m
- Yli 120 m³ LNG varaston ja rakennusten välinen etäisyys: 15 m
- Turvallisuusvälineistä on ohjeistettu, esim. vuotoilmaisimet, lämpötilamittauksia, liekki-ilmaisimia, painemittauksia, hätäsulut, turvallisuuskyltit jne.
- Jos LNG-tankkausasema on liikuteltava (movable), siirtämisen aikana laitteistossa ei saa olla LNG:tä eikä paine saa olla yli 0,05 MPa (0,5 bar).
- Jos LNG-tankkausasema on integroitu ajoneuvoon (mobile), tulee aseman olla hyvin kiinnitetty ajoneuvoon
- Itsepalveluasiakkaista tulee olla LNG-tankkausaseman operoijalla ylläpidetty asiakasrekisteri ja kyseisillä asiakkailla tulee olla koulutus tankkaukseen. Muut kuin koulutetut itsepalveluasiakkaat eivät saa tankkata. Lisäksi tankkausasemalta tulee olla kommunikointimahdollisuus operoijaan (esim. help-desk puhelin).

2.2.2 Vaatimukset Suomessa

Tukes ja Suomen kaasuyhdistys ovat tehneet erillisen ohjeen vuonna 2011 maa- ja biokaasukäyttöisten ajoneuvojen paineistetun kaasun (CNG) tankkausasemien suunnitteluun ja rakentamiseen [2]. Ohje koskee kaupalliseen käyttöön tarkoitettuja asemia. Ohjetta ei sovelleta matalapaineisiin (20-50 mbar) maakaasun kotitankkauslaitteisiin (home refuelling appliance, HRA) tai maakaasun pienituottoisiin ja vesitilavuudeltaan alle 500 litran varastollisiin tankkauslaitteisiin (vehicle refuelling appliance, VRA).

Tankkausasemien suunnittelussa tarvitaan vastaavanlaisia lupia kuin biokaasun tuotannossa ja varastoinnissa, eli

- Rakennus- tai toimenpidelupa. Luvan myöntää kunnan rakennusvalvontaviranomainen
- Rakentamislupa. Luvan myöntää turvatekniikan keskus (TUKES) maakaasuasetuksen mukaisesti
- Kaasuputkiston sijoituslupa

Suojaetäisyyksiä tankkausaseman ulkopuolisiin kohteisiin määritettäessä tankkausasemat jaetaan seuraaviin ryhmiin asemaan kytketyn kaasun tulopaineen mukaan:

I) Yli 16 bar. Vähimmäisetäisyydet 25 m tai 50 m

II.1) Alle 16 bar ja varaston vesitilavuus yli 4000 litraa. Vähimmäisetäisyydet 25 m

II.2) Alle 16 bar ja varaston vesitilavuus yli 4000 litraa. Vähimmäisetäisyydet 10 m tai 5 m

Etäisyydet sähköjohtoon: Ryhmään I kuuluvan tankkausaseman vaakasuora etäisyys vähintään 110 kV avojohtoon tulee olla vähintään 100 m. Ryhmään II kuuluvan aseman minimietäisyys vähintään 110 kV avojohtoon on 30 m (edellyttäen, että kaasu tuodaan asemalle muoviputkella). Asemaa ei saa sijoittaa suoraan avojohdon alle riippumatta johdon jännitteestä.

Jakeluaseman sisäiset vähimmäisetäisyydet ovat seuraavia: Jakelumittari tulee sijoittaa vähintään 5 metrin päähän jakeluaseman rakennuksista ja ajoneuvojen pysäköintiin varatuista alueista. Jakelumittarin etäisyys tontin rajaon on vähintään 4 metriä ja jakeluaseman ulkopuolisiin rakennuksiin vähintään 8 metriä.

Tankkausaseman tekniset vaatimukset noudattelevat aiemmin mainittuja eurooppalaisia standardeja. Näiden lisäksi on joitakin tarkempia huomion arvoisia vaatimuksia:

- Turvallisuusvarusteista: pääsulkuventtiili kaasun tuloputkessa, paineen ja lämpötilan säätö- ja turvajärjestelmä, jatkuvatoiminen vuodonilmaisujärjestelmä, lämpötilakompensoitu täyttöjärjestelmä, riittävä määrä hätäseis -painikkeita, suojarakennusten tulee olla palamatonta (vähintään A2-s1, d0-luokan, E1 Suomen rakentamismääräyskokoelma) materiaalia, varoitusmerkinnöt, alkusammutuskalusto (vähintään yhdellä 6 kg:n 24A 144BC luokan käsisammuttimella) ja toimintaohjeet hätätilanteiden varalta
- Ajoneuvoihin tankattavan kaasun tulee olla hajustettua. Kaasun vesipitoisuus saa olla enintään 32 mg/Nm³ (kastepiste - 9 °C 200 bar paineessa)
- Suositeltava varastotyyppi on kaasupullo. Kaasuvaraston maksimipaine on 300 bar. Kompressoriyksikön ja jakelumittarin välinen kaasuputki valmistetaan tarkoitukseen sopivasta materiaalista. Putki sijoitetaan maan alle, peitesyvyys on vähintään metri ja putki merkitään merkintänauhalla
- Jakelumittari sijoitetaan korokkeelle siten, ettei liikenne aiheuta jakelumittarille vaaraa. Yleensä koroke varustetaan törmäysuojalla

Tarkastuksia tankkausasemalle tehdään ennen käyttöönottoa ja sen aikana säännöllisesti.

Ennen tankkausaseman käyttöönottoa asemalle tehdään rakennetarkastus, sähkövarmennustarkastus, mittalaitteiston käyttöönottotarkastus ja pelastusviranomaisen suorittama käyttöönottotarkastus (erityinen palotarkastus).

Käyttöönoton yhteydessä tankkausasemalle suoritetaan tarkastus, jossa todetaan ennen käyttöönottoa tehtyjen huomioiden korjaukset. Lisäksi tarkastetaan valvontayhteyksien toimivuus, laitteiston tiiviyys ja kaasuvuotoilmaisimien toiminta testikaasun avulla.

Käytön aikana tankkausasemalle tehdään mittauslaitteiston määräaikaistarkastus, maakaasuasetuksen mukainen määräaikaistarkastus kahdeksan vuoden välein ja operoinnista vastaavan henkilön tulee suorittaa kirjallisen huolto-ohjelman mukaisia tarkastuskäyntejä.

2.3 Kaasun varastointi ajoneuvoissa

UN/ECE-sääntö nro 110 (2015) yhdenmukaistaa CNG:tä ja LNG:tä polttoaineena käytävien ajoneuvojen erityisosat, mukaan lukien polttoainesäiliöiden vaatimukset ja tyyppihyväksynät [3]. Säännös koskee lähinnä M- ja N-luokkia (henkilöautot, linja-autot, pakettiautot, kuorma-autot) ja on hyvin kattava ja yksityiskohtainen, joten tähän on koottu polttoaineen säilytyksen kannalta oleellisimpina pidettäviä asioita:

- 18.1.2 Kaikkien järjestelmän osien on oltava tämän säännön I osan mukaisesti tyyppihyväksytyjä erillisinä tai monitoimiosina
- 18.2.1 Mikään CNG- ja/tai LNG-järjestelmän osa, osiin kuuluvat suojamateriaalit mukaan luettuina, ei saa ylittää ajoneuvon ääriivivoja
- 18.2.2 Asianmukainen suojaus viereisten osien kuumuudelta on otettava huomioon eikä mikään CNG- ja/tai LNG- järjestelmän osa ei saa sijaita alle 100 mm:n etäisyydellä pakoputkesta tai vastaavasta lämmönlähteestä, ellei osia ole asianmukaisesti suojattu kuumuudelta
- 18.4.3 Kun ajoneuvo on käyttövalmis, polttoainesäiliön on sijaittava vähintään 200 mm tienpinnan yläpuolella
- 18.5.1.1 Automaattinen kaasupullonventtiili on asennettava suoraan jokaiseen CNG-säiliöön
- 18.5.5.1 CNG-polttoainesäiliöön asennetaan kaasutiivis kotelo, joka peittää CNG-säiliöiden liitokset ja joka on 18.5.5.2–18.5.5.5 kohdan vaatimusten mukainen, ellei CNG-säiliöitä ole asennettu ajoneuvon ulkopuolelle
- 18.5.5.4 Moottoriajoneuvon korin pohjassa sijaitsevilla kaasutiiviin kotelon tuuletukseen käytettäviä yhdysletkuja ja poistoputkia varten on varattava pinta-alaltaan vähintään 450 mm²:n vapaa aukko
- 18.5.5.5 CNG-säiliöiden liitokset ja yhdysletkut peittävän kotelon on oltava kaasutiivis 10 kPa:n paineessa ilman, että pysyviä vääntymiä ilmenee. Näissä olosuhteissa voidaan sallia vuoto, joka on korkeintaan 100 cm³ tunnissa
- 18.11.2 Ajoneuvoissa, joissa useampia kuin yksi polttoainejärjestelmä, on oltava polttoaineen valintajärjestelmä, jonka estettävä sekä kaasumaisen polttoaineen virtaus bensiini- tai dieselsäiliöön, että bensiinin tai dieselin virtaus kaasupolttoainesäiliöön myös polttoaineen valintajärjestelmän vikaantuessa
- 18.12 LNG-järjestelmä on suunniteltava siten, että estetään mahdollinen LNG:n ei tarkoituksen mukainen varastoituminen (trapping)
- 18.13 Luokan M (henkilökuljetusajoneuvot) ajoneuvojen LNG-järjestelmä on varustettava maakaasun ilmaisimella ja/tai kaasutiiviillä kotelolla. Luokan N (lastin kuljetusajoneuvot) ajoneuvojen LNG-järjestelmä voidaan varustaa maakaasun ilmaisimella, jos polttoaineen varastointisäiliö ja siihen liittyvät putket on asennettu ajoneuvon ulkopuolelle ilman mahdollisuutta kaasun jäämisestä loukkuun (vrt. 18.12 kohta). Jos polttoaineen varastointisäiliö sijaitsee luokan N ajoneuvon lastitilan sisällä, maakaasun ilmaisin ja/tai kaasutiivis kotelo on pakollinen
- Liite 3A: Paineistetun maa- ja biokaasun (CNG) säilyttämiseen ajoneuvossa tarkoitettut suurpaineputket jaetaan neljään ryhmään valmistusmateriaalien suhteen, tarkemmin kts. 3.2.2:

- CNG-1 Metalli
 - CNG-2 Metallivuoraus, joka on vahvennettu hartsikyllästetyillä jatkuvilla filamenttikuiduilla (lieriöosa päällystetty)
 - CNG-3 Metallivuoraus, joka on vahvennettu hartsikyllästetyillä jatkuvilla filamenttikuiduilla (kokonaan päällystetty)
 - CNG-4 Hartsikyllästetyistä jatkuvista filamenttikuiduista tehty päällyste, jossa vuoraus on muuta ainetta kuin metallia (kokonaan komposiittimateriaalia)
- Liite 3A: Liitteen lähtökohtana on polttoaineena käytettävänä maakaasun käyttöpaine 20 MPa vakiintuneessa 15 °C:n lämpötilassa ja enimmäistäyttöpaine 26 MPa. Laskelma voidaan sovittaa muille käyttöpaineille kertomalla paine sopivalla kertoimella (suhde). Esimerkiksi jos järjestelmän käyttöpaine on 25 MPa, paineet on kerrottava 1,25:llä. Kaasupullon käyttöiän määrittelee valmistaja ja se voi vaihdella sovelluksista riippuen. Käyttöikä määritellään sen perusteella, että kaasupullot täytetään 1 000 kertaa vuodessa vähintään 15 000 täytökertaa. Enimmäiskäyttöikä on 20 vuotta
 - Liite 3B: Nestesäiliöt - Polttoaineena käytettävän maakaasun säilyttämiseen ajoneuvossa tarkoitettu tyhjiöeristetty säiliö. Säiliöiden on oltava jotakin määriteltyihin käyttöolosuhteisiin soveltuvaa austeniittista ruostumatonta terästä, ja niiden suunnittelun ja valmistustavan on sovelluttava tarkoitettuun käyttöön.
 - Liite 3B: Liite perustuu käyttöpaineeseen, joka on pienempi kuin 26 MPa. Laskelma voidaan sovittaa muille käyttöpaineille (WP) kertomalla paine sopivalla kertoimella (suhde) seuraavaa kaavaa käyttäen: $P_{test} = 1,3 (WP + 0,1)$ [MPa]. Säiliön käyttöiän määrittelee valmistaja ja se voi vaihdella sovellusten mukaan
 - Liite 3B, 2.4: Vetyä saa olla enintään 2 tilavuusprosenttia, jos säiliöt on valmistettu teräksestä, jonka enimmäisvetolujuus on yli 950 MPa
 - Liite 5D: CNG:n/LNG:n kanssa kosketuksissa olevan ei-metallisen osan tilavuus ei saa muuttua tai paino laskea liikaa. Testi tehdään n-pentaaninkestävyys standardin ISO 1817 mukaisesti. Tilavuuden muutos saa olla enintään 20 prosenttia ja massa saa vähentyä enintään 5 prosenttia alkuperäiseen arvoon verrattuna

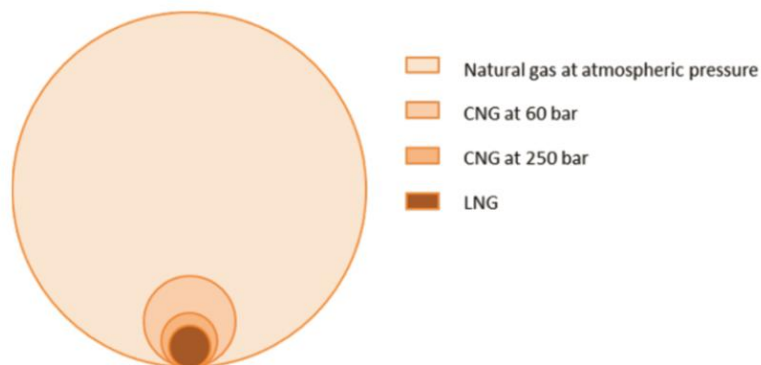
3. Nykyinen varastointiteknologia

Maakaasusta (natural gas, NG) noin 85-95 % on metaania (CH_4). Biokaasusta (Biogas, BG) tyypillisesti 60% on metaania, ja jalostamalla biokaasua eli poistamalla hiilidioksidia sekä muita epäpuhtauksia saadaan biokaasusta tuotettua hyvin puhdasta metaania, josta käytetään alkuperän vuoksi nimeä biometaani (BM). Paineistettua (yleensä 200 bar tai 250 bar) maakaasua kutsutaan lyhenteellä CNG (compressed natural gas) ja vastaavaa biometaania lyhenteellä CBM (compressed biomethane). Nesteytettyä maakaasua kutsutaan lyhenteellä LNG (liquified natural gas) ja vastaavaa biometaania LBM (liquified biomethane). Metaanin tiheys ja tehollinen lämpöarvo normaalitilassa (1 bar, 0 °C), 200 bar paineessa sekä nestemäisenä on esitetty alla Taulukko 2:ssa.

Taulukko 2. Metaanin teholliset lämpöarvot eri lämpötiloissa ja paineissa.

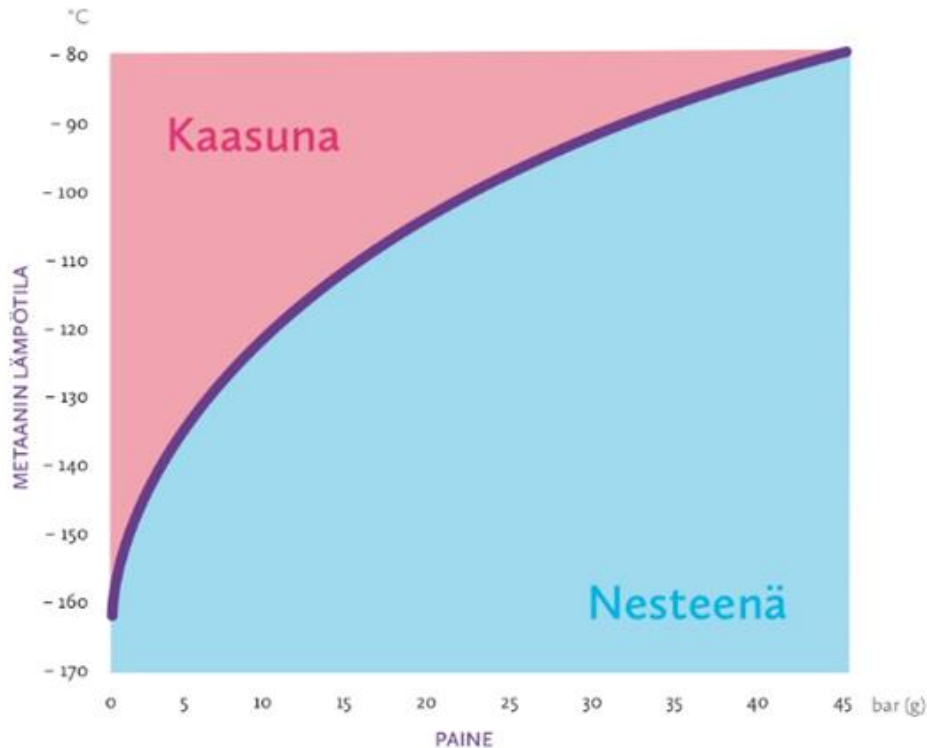
		Normaalitila	CNG/CBM	LNG/LBM
Paine	bar	1	250	1
Lämpötila	C	15	15	-162
Tiheys	kg/m ³	0,7	180	423
Tehollinen lämpöarvo	MJ/kg	50	50	50
	MJ/m ³	38	9 000	22 200

Metaanin/maakaasun tilavuus muuttuu merkittävästi riippuen siitä, onko kyseessä ilmanpaineinen normiolosuhteissa oleva metaani, 200 bar paineessa oleva metaani vai nesteytetty metaani (Kuva 2). Verrattuna dieseliin (35 900 MJ/m³) on yhden diesellitran energiasisältö sama kuin 4 l CNG (250 bar) tai 1,6 l LNG.



Kuva 2. Suhteellinen tilavuus maakaasua samaa massayksikköä kohden eri olosuhteissa. [4]

Metaanin olomuoto (kaasumainen vai nestemäinen) riippuu lämpötilasta ja paineesta (Kuva 3). Metaani on nestemäistä ilmanpaineessa alle -164 °C lämpötilassa.



Kuva 3. Metaanin faasin riippuminen lämpötilasta ja paineesta. [5]

Osa laitekustannuksista on skaalattu vuoteen 2017 käyttäen Chemical Engineering -lehden tehdaskustannusindeksiä inflaation huomioimiseksi. Kustannus dollareina (US) on muutettu euroiksi vuoden 2017 vuoden keskimääräisellä kurssilla 1€=1,13\$ [6], [7].

3.1 Biokaasun ja biometaanin välivarastointi

Säilytysratkaisujen ylämittakaavaksi rajattiin biokaasulaitosten koko Euroopassa. Suomessa suurimmat biokaasulaitokset tuottavat 14 000 000 Nm³ kaasua vuodessa ja, maatilalaitokset 16 000 Nm³ vuodessa. Esimerkiksi Tanskan suurin laitos tuottaa 75 000 000 Nm³ biokaasua vuodessa [8].

Biometaanin (sekä maakaasun ja biokaasun) säilytysratkaisut voidaan jakaa

- kaasuvarastoon
 - matalapaineinen
 - korkeapaineinen
- nestemäiseen varastoon
 - nesteytetty metaani
- kiinteään varastoon
 - absorbointi väliaineeseen
 - adsorbointi väliaineeseen

Kiinteä varastointi on tällä hetkellä tutkimus ja kehitys- sekä demonstroitivaiheessa. Kiinteän varastoinnin vaihtoehtoja on metaanin absorbointi ja adsorbointi väliaineeseen. Näistä metaanin adsorbointiteknoologioita käsitellään tarkemmin seuraavassa luvussa 4, jossa on selvitetty adsorbointiteknoLOGIAN tulevaisuuden ratkaisuja.

Tällä hetkellä kaupallisesti saatavilla olevia teknisiä ratkaisuja ovat kaasumaiset ja nestemäiset varastointiratkaisut, jotka käsitellään tässä luvussa.

Metaanin varastointi ja sen kustannusvaikutus on yleensä vain osa koko konseptin kustannusta, ja kustannusten arvioinnissa tulee ottaa huomioon kaikki konseptin osat. Esimerkiksi nestemäinen varasto voi tarkoittaa käytännössä esimerkiksi sitä,

- että metaani toimitetaan paineistettuna/nestemäisenä paikan päälle
- tai että metaanin valmistus PtG-periaatteella tehdään varsin suuressa mittakaavassa
- tai että biokaasun jalostus biometaaniksi tehdään paikan päällä

Biokaasun jalostusprosessi ja biometaanin kompressointiprosessi ovat erilliset ja ne voidaan valita suhteellisen vapaasti riippumatta toisistaan.

Kaasumainen varastointi on tyypillisesti pienessä mittakaavassa halvempaa, jolloin suunniteltu mittakaava ohjaa varastointivaihtoehdon valintaa.

Matalapaineinen varastointi tarkoittaa usein merkittävästi suurempaa fyysistä tilantarvetta kuin korkeassa paineessa toteutettu varastointi, kts. Kuva 2. Korkeapaineisen kaasun varastointisäiliön investointikustannus on suuri, mutta tilantarve pieni. Lisäksi nykyinen kompressointitekniikka kuluttaa huomattavasti sähköenergiaa. Näiden seikkojen vuoksi jalostamaton biokaasu säilytetään yleensä lähes aina matalapaineisessa varastossa, koska inerttien kaasujen kompressointiin tai säilytykseen ei kannata investoida.

3.1.1 Varastointi kaasufaasissa

Kaasun varastointisäiliöt jaotellaan tässä matalapaineisiin sekä korkeapaineisiin säiliöihin. Korkeapaineisten säiliöiden ylärajana on tankkauspainne sekä varastointipaine jotka ovat määritetty luvuissa 2.2 ja 2.3 esitettyjen standardien mukaisesti. Tämä pätee sekä biokaasulle, maakaasulle että metaanille.

Biokaasun säiliön valinnassa täytyy huomioida se, sisältääkö kaasu vielä rikkivetyä tai vettä, sillä kumpikin kaasu voi aiheuttaa korroosiota, vaikka kaasu olisi osittain puhdistettua. Taulukko 3:een on koottu Krich et al [9] listaamia erilaisia vaihtoehtoja biokaasun säilytykselle farmikokoluokassa. Biokaasun paineistettu säilytys on harvinaista.

Taulukko 3. Maatilakäyttötarkoitukseen yleisesti käytettyjä säilytysvaihtoehtoja biokaasulle ja biometaanille. [9]

Purpose of Storage	Pressure (psi)	Storage Device	Material	Size (ft ³)
Short and intermediate storage for on-farm use (currently used on farms for biogas storage)	< 0.1	Floating Cover	Reinforced and non-reinforced plastics, rubbers	Variable volume usually less than one day's production
	<2	Gas bag	Reinforced and non-reinforced plastics, rubbers	150 – 11,000
	2 – 6	Water sealed gas holder	Steel	3,500
		Weighted gas bag	Reinforced and non-reinforced plastics, rubbers	880 – 28,000
		Floating roof	Plastic, reinforced plastic	Variable volume, usually less than one day's production
Possible means of storage for later on- or off-farm use (could be used for biomethane)	10 – 2,900	Propane or butane tanks	Steel	2,000
	>2,900	Commercial gas cylinders	Alloy steel	350

3.1.1.1 Matalapaineiset kaasusäiliöt

Perinteisten, teräksestä valmistettujen säiliöiden lisäksi kaasulle/biokaasulle on säilytystekniikoita, joissa säiliön tilavuus vaihtelee kaasun säilytystarpeen perusteella. Tällaisia tekniikoita ovat kaasukellot sekä membraaniteknologiaan perustuvat kaasusäiliöt.

Perinteisen teräksestä valmistetun säiliön tilavuus ei muutu, joten paine säiliössä vaihtelee biokaasun/metaanin määrän vaihdeltaessa. Lisäksi erityisesti puhdistamaton biokaasu lisää korroosioriskiä ja siten vaikuttaa materiaalivalintaan nostamalla säiliön hintaa.

Kaasukello (gasometer /gas holder) on hieman ilmanpainetta korkeammassa paineessa säilytettävän kaasun varastointiin tarkoitettu suuri kaasusäiliö. Kaasukelloilla on kaksi erilaista päärakennetta [10].

- tilavuudeltaan vaihteleva, vesilukkoon (water-sealed) perustuva kaasukello
- jäykät vedettömät kaasusäiliöt, joissa kaasusäiliön tiiviys perustuu
 - öljylukkoon (oil-sealed)
 - rasvalukkoon (grease-sealed)
 - membraaniteknologiaan perustuvaan kuivalukkoon (dry seal)

Kaasukello on tyypillisesti tarkoitettu toimimaan puskurina erityisesti vaihtelevan tuotannon ja kulutuksen välissä, ei niinkään kaasun pitkäaikaiseen säilytykseen. Suomen muut kaasukellot on poistettu käytöstä, mutta Raahessa terästehtaalla on edelleen käytössä 3 kaasukelloa. Uusin on valmistunut 1990-luvulla. Kaasukellot tasapainottavat masuuni- ja koksikaasun tuottoa ja kulutusta. [11]

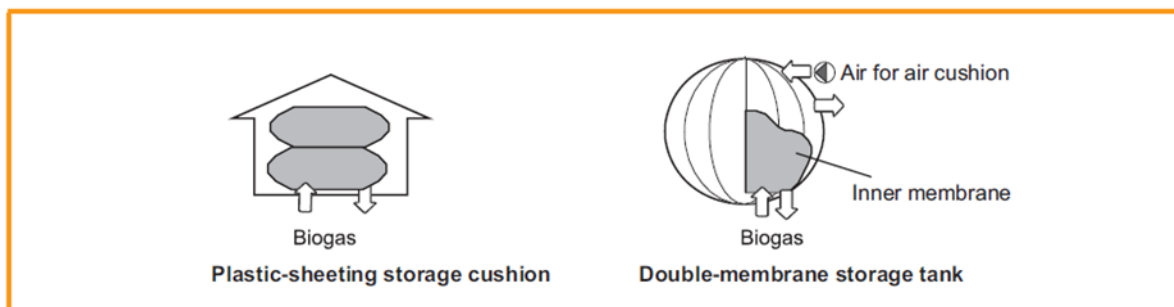
Biokaasua säilytetään tyypillisesti matalapainesäiliössä. Usein matalapaineisen biokaasun säilytyksessä kyseessä on välivarastointi, jonka tarkoitus on tasata kulutuksen ja tuotannon vaihtelua. [9] Biokaasua voidaan säilyttää matalassa paineessa joko erillisessä säiliössä, tai sitten kaasun välivarastointia varten voidaan rakentaa mädätyslaitoksen katolle kelluva kaasusäiliö/kaasuhuppu (Kuva 2). [12]

Mädätyslaitoksen katolla kelluva kaasusäiliön materiaaleina yleisesti käytetään joko terästä, lasikuitua tai joustavaa kangaskudos materiaalia. [9] Tämän ratkaisun hyötyihin kuuluu edullinen investointikustannus, sekä tilan säästö.



Kuva 4. Esimerkkejä matalapainesäiliöistä biokaasulle. [12]

Mädätysreaktorista erillinen kalvoperusteinen matalapainesäiliö voi joko muistuttaa malliltaan patjaa/tyynyä (plastic sheeting cushion), jolloin se tarvitsee suojakseen ulkoseinät, kts. Kuva 5. Toinen vaihtoehto on, että varsinaista säiliötä ympäröi toinen kerros muovikalvoa, niin kutsuttu kaksoiskalvosäiliö, kts. Kuva 5 ja Kuva 6. Tässä tapauksessa kalvojen välissä on ilmakerros, jonka ylläpitämistä varten tarvitaan myös ilmakompressori. [12] Hyvänä puolena mädätysreaktorista erillään olevassa säiliössä on se, että se mahdollistaa suuremman välivaraston käyttämisen. Huonot puolet ovat tarvittava maanpäällinen tila sekä mahdollisesti tarvittava ylimääräinen rakennus (mikäli kyseessä on patja/tyyny -säiliötyyppi). Lisäksi jos säiliö on sisätilassa, tarvitaan erittäin hyvä ilmanvaihto, ettei rakennukseen muodostu räjähtävää seosta. Huoltoa ei juurikaan tarvita ja huoltokustannukset ovat siksi hyvin alhaiset. Matalapainesäiliön kapasiteetti voi ylittää 2000 m³. [12]



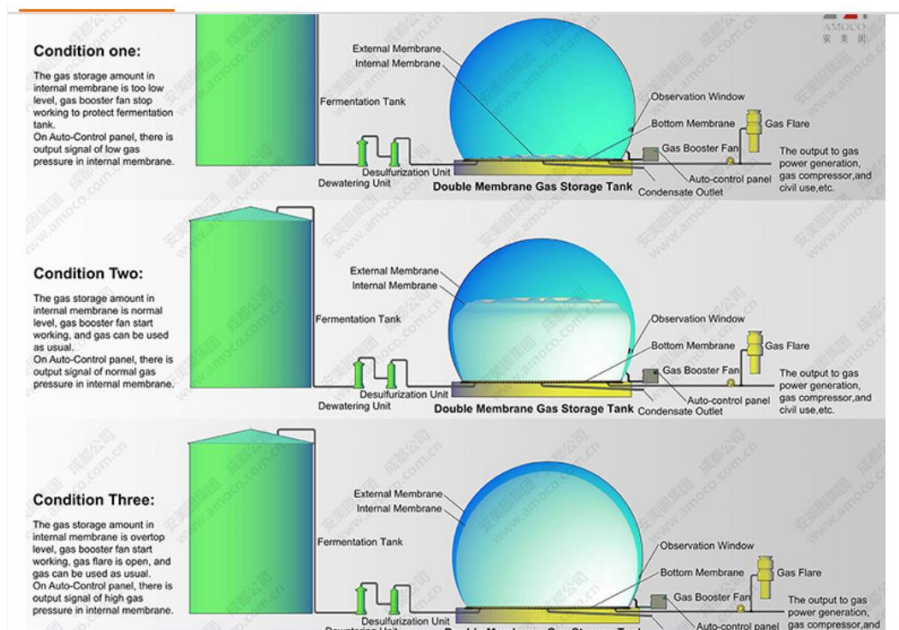
Kuva 5. Matalapainesäiliötyypit biokaasulle. [12]



Kuva 6. Esimerkki kaksoiskalvosäiliöstä. [12]

Kaksoiskalvosäiliön biokaasun säilytykseen kehitti itävaltalainen yritys Sattler Ag yli kolmekymmentä vuotta sitten. [13] Sattler valmistaa säiliöitä edelleen. Materiaali on tyypillisesti joustavaa, PVC:llä päällystettyä polyesterikangasta. [14] Päällimmäinen materiaali on myös lumen ja sään kestävä. Korrosio ei ole ongelma, joten säiliö sopii erityisen hyvin biokaasulle tai biometaanille, jonka puhdistus ei ole riittävä paineistettuihin teräsastioihin.

Kaksoiskalvosäiliössä on nimensä mukaisesti kaksi kalvoa, ulompi ja sisempi. Ulompi säilyttää muotonsa koko ajan, sen sijaan sisempi kalvo joustaa kaasun määrän mukaan, kts. Kuva 7. Ulomman kalvon muoto pysyy, sillä kalvojen väliin puhalletaan jatkuvasti ilmaa kompressorilla, siten että kahden kalvon välisen tilan paine pysyy vakiona. Ilmakompressorin toimii jatkuvatoimisesti. Rakennusratkaisu on edullinen, sillä kalvojen alle pitää rakentaa perusteet sekä sisään ja ulostuloputket metaanille.



Kuva 7. Kaksoiskalvosäiliön toimintaperiaate. https://www.alibaba.com/product-detail/CE-certificated-Membrane-Biogas-Storage-Tank_581800982.html

Nykyään verkosta löytyy Sattlerin lisäksi muita valmistajia, jotka tarjoavat samaa ratkaisua (CST, VSO Biogas Technologies of France). [14]

Muun muassa kiinalainen AMOCO Group myy kaksoiskalvosäiliöitä hintaan 5 000 - 500 000 \$ kapasiteetille 50 - 10000 m³. [15] Käyttöäksi markkinoidaan 15 vuotta. Materiaali on PVC-päällystettyä polyesteriä, monikerroksinen kalvo.

3.1.1.2 Korkeapaineiset kaasusäiliöt (paineastiat)

Kaasusäiliö voi olla paineistettu joko tankkauspaineseen (max 260 bar) tai sitten matalampaan paineeseen.

Paineistetut kaasusäiliöt edellyttävät hyvin puhdistettua kaasua korroosion välttämiseksi. Paineen kasvaessa puhtausvaatimukset tiukentuvat. Biokaasun kohdalla suurimmat korroosion aiheuttajat ovat rikkivety ja vesi, korkeissa paineissa jopa hyvin pieninä pitoisuuksina. Biokaasun paineistettu säilytys onkin harvinaista. Paineastian investointi- ja ylläpitokustannukset ovat suuria, joten tyypillisesti vasta jalostettu ja puhdistettu biometaanin paineistetaan. [14]

Suurten paineistettujen terässäiliöiden lisäksi metaania voidaan varastoida kaasumaisessa muodossa kaasupullo- ja monisäiliökonteissa. [16] Kun säilytettävän kaasun määrä vaihtelee, voi olla tehokkaampaa ja taloudellisesti kannattavampaa säilyttää kaasua useassa pienemmässä paineestiassa/kaasupullossa yhden suuren säiliön sijasta.

Paineistettu kaasusäiliö, jota ei tarvitse siirtää, voi olla myös painava. Sen sijaan säiliö, jota halutaan liikuttaa (polttoainesäiliö ajoneuvossa/työkoneessa tai CNG:n/LNG:n siirtokuljetus), kannattaa pyrkiä suunnittelemaan mahdollisimman kevyeksi, eli käyttämään kevyitä materiaaleja. Lait ja asetukset ohjaavat käytännössä paineastian suunnittelua (tarkemmin kappaleessa 2.1). Paineastiat suunnitellaan paineestiastardeissa olevien kaavojen ja ohjeiden perusteella, halutun suunnittelupaineen ja säiliön massan tai tilavuuden perusteella. Kaasusäiliöt voidaan jakaa materiaalin perusteella eri tyyppeihin. Samaa luokitusta käytetään myös standardeissa (kappale 2.3). Halvin ja painavin paineastia (tyyppi I) on valmistettu teräksestä (teräksen tulee olla sitkeää erikoisterästä, ja jos on korroosioriski niin korroosion kestävä). Kevyemmät komposiittimateriaaleihin perustuvat ratkaisut ovat kalliimpia kuin teräs.

Pienukkojen tyyppien I-IV kaasusäiliöiden karkea kustannusarviovertailu tilavuutta kohti on esitetty alla Taulukko 4:ssä.

Taulukko 4. Paineistettujen kaasusäiliöiden kustannusarvio tyyppistä riippuen. [17]

CNG säiliön tyyppi		I	II	III	IV
Suuntaa antava hinta* tilavuutta kohti	€ ₂₀₁₇ /l	3-5	5-7	9-13	11-17

* Kustannus skaalattu kemianteollisuuden indeksin (CEPCI) perusteella vastaamaan vuotta 2017 [6] ja muutettu dollareista (US) euroiksi vuoden 2017 kurssilla 1€=1,13\$ [7].

Toinen hintaesimerkki on James et al [18] raportista. Valmistajalta saatu hintatieto tyyppien III kaasusäiliölle, jonka tilavuus on 268 l, oli 2587 \$₂₀₁₆ ennen asennusta, kts. Taulukko 5. Ko. pullon hinta tilavuutta kohti on tällöin 9 €₂₀₁₇/l. Asennuksen arvioitiin lisäävän kustannusta 10%. [18]

James et al [18] mukaan tyyppien IV kaasusäiliöt ovat vasta tulossa suuren mittakaavan massatuotantoon. James et al arvioivat, että tyyppien IV kaasusäiliön tämän hetkinen hinta on 7800 \$₂₀₁₆ (26 €₂₀₁₇/l), mutta on mahdollista, että pullon hinta saattaa valmistusmäärän kasvaessa laskea merkittävästi. [18] James et al arvioivat, että jopa 1400 \$₂₀₁₆ (5 €₂₀₁₇/l) valmistuskustannus pullolle olisi mahdollista saavuttaa 10 000 pulloon vuodessa valmistavalla tehtaalla, jos koko tuotantoprosessi saadaan optimoitua, kts. Kuva 8.

WE R CNG mainostaa 246 l tyyppien III säiliön hinnaksi 3419 \$ eli 12 €/l ja paino tilavuutta kohti on 0,44kg/l. [19]

Taulukko 5. Kaupallisesti saatavilla olevan tyyppin III kaasusäiliön hinta ja ominaisuudet. [18]

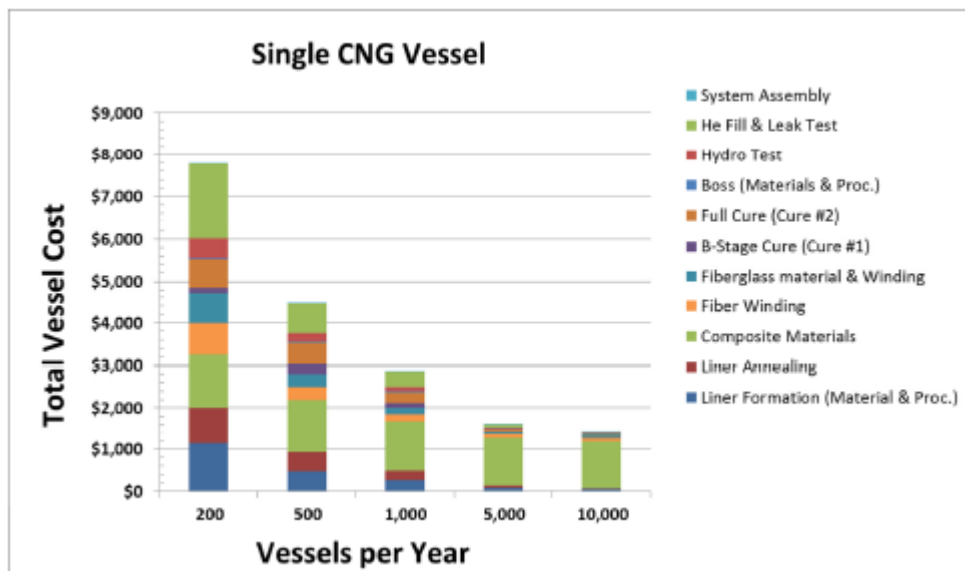
	Units	Commercial System ¹
Annual Production ²	units/year	1,000
Interior Volume	L	268
Tank Mass	kg	70.8
Tank Cost ³	\$	2,587
Manufacturers Markup ⁴	%	15
Installer Markup ⁴	%	10
Tank Price	\$	3,272

¹ Values are the average from vendors polled

² Commercial production volumes are estimated

³ Estimated from assumed markups for commercial systems

⁴ Estimated for manufacturer and installer



Kuva 8. Arvio kustannusten jakaumasta tyyppin IV CNG kaasusäiliön tulevaisuuden tuotantomäärästä riippuen. [18]

Frost & Sullivan arvio vuonna 2016 julkaisemassaan maakaasua käyttäviä kuorma-autoja koskevassa markkinaselvityksessä ajoneuvokäyttöön tehtyjen CNG säiliöiden kustannuksen laskevan Euroopassa ja Pohjois-Amerikassa noin 30 % vuoteen 2025 mennessä vuoden 2015 tasosta. Pääasiallinen syy säiliöiden kustannusten laskulle on säiliöiden valmistuksen määrän kasvu ja kehitys säiliötekniologiassa. [20]

Monisäiliökontti (multiple element gas container, MEGC) tarkoittaa astioita tai pulloja, jotka ovat kiinnitetty toisiinsa kokoojaputkistolla ja kiinnitetty monisäiliökontin kehikkoon standardin mukaisesti. Säiliötyyppejä ovat mm. kaasupullot ja paineastiat. Standardeista liittyen kaasupulloihin, säiliöihin ja paineastioihin ja MEGC-ratkaisuihin on kerrottu kappaleessa 2.1. Siirtokonttien hinnat vaihtelevat materiaalien ja kapasiteetin mukaan. Kontteja on saatavana teräspulloissa tai komposiittipulloissa. Komposiittipullot ovat kevyempiä ja tilavuudelta suurempia, mutta myös kalliimpia. Esimerkiksi Worthington valmistaa kontteja, jotka sisältävät 270 l tyyppin III kaasupulloja 35-150 kpl CNG:n säilytykseen ja kuljetukseen, Kuva 9. [21] Kontin tyhjäpaino (ei kaasua) on 5050 - 21617 kg pullojen määrästä riippuen.



Kuva 9. Worthingtonin valmistama monisäiliökontti (MEGC), joka koostuu tyypin III kaasupulloista. [21]

3.1.2 Varastointi nestefaasissa

Metaanin tiheys kasvaa nesteyttämällä lähes 600 kertaiseksi (LNG tiheys 420-450 kg/m³, lupa-asioissa käytetään 500 kg/m³). Suuren energiatihedyyden lisäksi nesteytetyn metaanin etuja on sen energiatehokas kuljettaminen jo olemassa olevaa kalustoa hyödyntäen (verrattuna kaasun kuljettamiseen korkeassa paineessa tai ilmanpaineessa), sekä se että sitä voi tankata sekä LNG että CNG ajoneuvoihin (tosin CNG-ajoneuvoja varten tarvitaan erillinen höyrystyslaitteisto).

Maailmanlaajuisesti nesteytetyn metaanin pienen mittakaavan säilytys tapahtuu tyypillisesti 500-5000 m³ säiliöissä. [22] Maalla olevat säiliöt voidaan jakaa

- paineistettuihin
 - o pallomaisiin säiliöihin (spherical tanks). Nämä ovat kuitenkin harvinaisia ratkaisua.
 - o sylinterimäinen säiliö puolipallon muotoisilla päillä (bullet tanks)
- ilmanpaineisiin
 - o tasapohjainen säiliö
 - o sylinterimäinen säiliö puolipallon muotoisilla päillä

Taulukko 6:een on koottu eri ratkaisuiden hyviä puolia ja heikkouksia. Vallitseva ratkaisu pienessä mittakaavassa on paineistettu säiliö (3-10 bar). [22]

Taulukko 6. Nesteytetyn metaanin säiliötyyppien hyviä ja huonoja puolia. [22]

Mode	Tank type	Advantages	Disadvantages
Pressurized	Bullet Tank	Savings on BOG management Saving possibly on pumps Pre-fabricated (= fast track)	Lower Safety Factor Limited storage capacity
	Spherical Tanks	Higher capacity than bullet Saving possibly on pumps Pre-fabricated (= fast track)	Limited storage capacity Lower Safety Factor
Atmospheric	Flat bottom	High Safety High capacity	Expensive Long item to build
	Bullet Tank	Pre-fabricated (= fast track) Less expensive	Limited storage capacity

Muodon lisäksi säiliöt voidaan jakaa rakenneratkaisun perusteella: [22]

- yksinkertainen suojaus (single containment, SC), jossa vaippa on valmistettu ei-kryogeenisiä lämpötiloja kestävästä teräksestä (ei sallittuja EN-standardissa)
- kaksinkertainen suojaus (double containment, DC), jossa sisempi vaippa on valmistettu kryogeenisiä lämpötiloja kestävästä teräksestä ja ulompi vaippa on valmistettu ei-kryogeenisiä lämpötiloja kestävästä teräksestä. Sisemmän ja ulomman vaipan välillä on ns. varasäiliö (storage pit), jonne LNG valuu sisemmän vaipan mahdollisen vuodon aikana
- täysi suojaus (full containment, FC), jossa myös ulompi vaippa on valmistettu kryogeenisiä lämpötiloja kestävästä teräksestä, ja jos sisempi vaippa vuotaa, höyryt pysyvät ulomman vaipan sisällä.

Säiliöiden mitoituksessa IGU:n [22] mukaan kannattaa kiinnittää huomiota seuraaviin kohtiin:

- säiliöön pitää mahtua yhden toimituksen koko sisältö (rekka/kuorma-auto)
- kulutuksen pitää olla suhteellisen säännöllistä. LNG:tä on vaikeaa säilyttää yli paria viikkoa ilman, että se pitää nesteyttää uudelleen.
- paineistetut tankit mahdollistavat edullisemman kaasumaiseksi metaaniksi haihtuvan kaasun (Boil-off gas, BOG) hallinnan
- paineistettu tankki ei välttämättä ole hyvä vaihtoehto, jos asiakas tarvitsee kylmää LNG:tä

Nyrkkisääntönä mainitaan, että nesteytetyn metaanin paineistettu säiliöratkaisu sopii useimmiten paremmin, kun vuosittainen kapasiteetti on alle 0,2 t/a, ja ilmanpaineinen ratkaisu suuremmalle säilytystarpeelle. Tällä hetkellä painesäiliön suurin koko on 1200 m³, mutta suurempia ratkaisuja on kehitteillä. [22]

Nesteytetyn maakaasusäiliön vaatimukset Suomessa on esitetty laissa ja määritelty yksityiskohtaisesti aiheeseen liittyvissä standardeissa (tarkemmin kappaleessa 2). Samat vaatimukset pätevät nesteytetyille metaanille ja biokaasulle. Nesteytetyn metaanin säiliö tulee Suomessa olla kaksivaippainen terässäiliö, jonka vaippojen välissä on tyhjiö lämmön eristämiseksi. [5] Nesteytetyn metaanin paine nesteytysprosessin ulostulossa on tyypillisesti 3,5 bar, mikä on usein myös nestemäisen metaanin matalapainesäiliön paine. [9] 3,5 bar paineessa nestemäisen metaanin lämpötilan tulee olla vähintään noin -150 °C. Kaiken materiaalin, joka saattaa joutua kosketuksiin nestemäisen metaanin kanssa, tulee olla kryogeenisiä lämpötiloja kestävä. [5] Säiliö sijoitetaan ulkotiloihin. Tarkempi kuvaus asiasta löytyy Suomen kaasuyhdistyksen sivuilta. [5]

Nesteytetyn metaanin säilytystä suunniteltaessa tulee ottaa huomioon nestemäisestä metaanista kaasumaiseksi metaaniksi haihtuvan kaasun (Boil-off gas, BOG) hallintaratkaisu. Nesteytetyn metaanin säilytyksen haaste on nesteytetyn metaanin lämpeneminen säilytyksen aikana, mikä johtaa sen haihtumiseen kaasuksi. Nestemäisestä metaanista kaasumaiseksi metaaniksi haihtuva osuus on tyypillisesti 0,1-0,5 % päivässä. [22] Jos kaasumainen metaani poistetaan säiliöstä, nesteytetyn metaanin paine ja lämpötila eivät muutu. Jos kaasumaista metaania ei poisteta, paine säiliössä kasvaa, kunnes paineenalennusventtiili aukeaa. Poistettaessa kaasumaista metaania säiliöstä laskee LNG:n metaaniluku, koska metaani pitoisuus pienenee. [22] Metaaniluvun laskulla saattaa olla vaikutuksia käyttökohteen toimintaan. Erityisesti kipinäsytytteisissä polttomootoreissa matalampi metaanipitoisuus vaikuttaa sen toimintaan heikentäen sen energiatehokkuutta. Poistamatta kaasumaista metaania säiliön painetta voidaan laskea tilapäisesti täyttämällä säiliötä alijäähtyneellä nestemäisellä metaanilla, joka lauhduttaa kaasuntunutta metaania takaisin nestemäiseen faasiin. BOGin hallintaan on kehitetty erilaisia tekniikoita, joilla on sekä hyviä puolia että heikkouksia, kts. Taulukko 7. BOG-ratkaisun valintaan vaikuttaa olennaisesti LNG:n säilytyksen kesto. Esimerkiksi Krich et al suosittelee, ettei nestemäistä metaania säilytettäisi yli viikkoa ennen käyttöä, koska yli viikon säilytysaika voi johtaa taloudellisesti kannattamattomaan toimintaan hävikin vuoksi. [9] Haihtuvan metaanin käsittely säilytyksen yhteydessä tulee huomioida jo suunnitteluvaiheessa, sillä se vaikuttaa kustannuksiin merkittävästi. [22] Metaani on myös erittäin voimakas kasvihuonekaasu, jopa 28 kertaa voimakkaampi kuin hiilidioksidi. Tämän johdosta metaanivuotoja tulee välttää koko elinkaarensa aikana.

Taulukko 7. Boil-off kaasun hallintaratkaisujen hyviä puolia ja heikkouksia. [22]

BOG mitigations	Mode	Advantage	Disadvantage
Top spray	LNG transfer	Effective, vapor collapse Low cost solution	Requires internals and topfill line + ESD valves Only if pressurized tank
Vapor return	LNG transfer	Relative low cost solution	Contributes to solution, but rarely a standalone solution (depending on flowrate)
BOG compressor	LNG transfer & storage	Allows BOG to be used as fuel gas/ regen gas or re-liquefy Enables to keep pressure constant Can be single BOG management mitigation method	Very costly Maintenance, reliability If subject to high flow changes, need an bypass to flare/vent
Minimize heat ingress	LNG transfer & storage	Effective Many options available (superinsulated/ vacuum/ PUR/ EPS/ PIR) Can be double containment (safety)	Contribute to solution, but rarely a standalone solution (depending on flowrate)
High throughput	LNG storage	Very effective No CAPEX	Contribute to solution, but rarely a standalone solution (depending on flowrate) Most effective with sub-cooled LNG Limited by customer demand and optimal parcel size
Pressurized storage	LNG storage	Allows more BOG accumulation. Could eliminate the need for pumps	Max volume constraints End-customer constraints
In tank Re-liquefying (coil)	LNG storage	Allows BOG intake Enables to keep pressure constant	Requires another cryogenic tank Coolant refilling required

Suomessa nestemäisen metaanin säiliöön mitoitetaan tilaa myös kaasufaasissa olevalle metaanille (nesteen täyttöaste on yleensä noin 90 %). Nesteytyslaitokseen investoiminen pelkästään boil-off kaasun nesteyttämiseksi uudelleen ei ole yleensä taloudellisesti kannattavaa. [5] Jos uudelleen nesteytysvaihtoehtoa ei ole, niin kaasuntunut metaani tulee ympäristösyistä hyötykäyttää.

Kryogeeninen teräslaatu X7Ni9, jota edellytetään nestemäisen metaanin säiliöissä, on määritelty standardissa EN10028. Laatu sisältää 9% nikkeliä.

Nesteytetyn metaanin säiliön kustannusta arvioitaessa tulee ottaa huomioon nestemäisestä metaanista haihtuvan kaasun hallintaratkaisu. BOG-ratkaisun valintaan vaikuttaa nesteytetyn metaanin säilytyksen kesto. Tyypillisesti BOG-ratkaisu on halvempi paineistetussa säiliössä. [22]

Nesteytetyn metaanin osalta kustannukseen liittyy usein merkittävänä osana nesteytyskustannus. Nesteytysprosessin kustannus on tyypillisesti 25-40%, loput kustannuksista koostuu pääosin säilytyksestä, putkista, instrumentoinnista, laitoksen ja muun infrastruktuurin rakentamisesta. [22]

IGU:n raportin kustannusarviossa ilmanpaineinen kryogeenisestä teräksestä valmistettu 28 000 m³ kaksoisvaippasäiliö (FC) maksaa 60 M\$, ja vastaava mutta suurempi säiliö (170 000 m³) 135 M\$ [22]. Tyypillinen kustannus säiliöille vaihtelee 800-3000 \$₂₀₁₅/m³ (720-2700 €₂₀₁₇/m³) pienen mittakaavan säiliöille (tyypillisesti 500-5000 m³). Hinta kuutiota kohden pienenee kapasiteetin kasvaessa. Paineistetut säiliöt ovat kuutiohinnoiltaan halvemmasta päästä. [22]

Krich et al mainitsevat biometaanille kaksi tyypillistä kokoluokkaa, 57 m³ (15 000 gallons) ja 23 m³ (6000 gallons) maanpäällisiin, paikallaan oleviin ratkaisuihin. [9] Tyypillinen kustannus 57 m³ nesteytetyn metaanin säiliölle on Krichin et al mukaan 170 000 \$₂₀₀₅ (3200 €₂₀₁₇/m³). [9] Krich et al mainitsi myös, että kryogeeniselle biometaanille sopivien pumppujen kapasiteetti on tyypillisesti 380 - 760 l/min ja hinta 15 000 - 25 000 \$₂₀₀₅. [9] Kryogeeninen biokaasun jalostus ja samanaikainen nesteytyslaitos, jonka syöttö on 5700 m³/d, maksaa noin 1 M\$₂₀₀₅ ja kuluttaa 300 kW sähköä. [9]

Haimila oli saanut laitetoimittajilta hinta-arvioksi 78 m³ LNG-säiliölle sekä höyrystimelle 0,15 - 0,20 M€. Säiliön ominaiskustannus oli 2500-3000 €/m³. [23]

Frost & Sullivan arvio vuonna 2016 julkaisemassa maakaasukäyttöisiä kuorma-autoja koskevassa markkinatutkimuksessa ajoneuvokäytössä olevien LNG säiliöiden kustannusten laskevan noin 20 - 25 % Euroopassa ja Pohjois-Amerikassa vuoteen 2025 mennessä vuoden 2015 tasosta. Pääasiallinen kustannuksia laskeva tekijä tutkimuksen mukaan on LNG ajoneuvojen myyntimäärän kasvu sekä kehitys LNG säiliötekniologiassa. [20]

3.1.3 Tankkaus

Metaanin säilytysratkaisu vaikuttaa metaanin tankkaamiseen. Metaanin tankkausasemat on jaettu nopeisiin ja hitaisiin.

Hidastankkausasemalla tankkauksen kesto voi olla tunteja, ja yleensä tankataan yön yli. Tämä johtuu siitä, että metaanin paineistus tehdään tankkauksen yhteydessä ja metaanin varastosäiliö on matalapaineinen. Tällainen ratkaisu sopii esimerkiksi kotitankkausasemille tai bussivarikoille. Kuluttajakäytössä tarvitaan nopeita tankkausasemia. Jos tankkaaminen voidaan toteuttaa yön yli, eli työkoneen tankki on riittävän suuri koko päivän polttoainetarpeelle, niin silloin hidastankkaus ei ole ongelma myöskään työkoneiden käytössä.

Jos metaania säilytetään tankkausaineessa eli korkeassa paineessa, kyseessä on nopeatankkausasema.

Mikäli metaania säilytetään nestemäisenä, on kyseessä aina nopea tankkausasema riippumatta siitä tankataanko ajoneuvoon nestemäistä vai paineistettua metaania. Jos tankataan paineistettua metaania, niin nestemäinen metaani höyrystetään korkeapaineiseen välivarastoon ja tankkaaminen tapahtuu sieltä.

3.1.3.1 Hidastankkausasema

Työkoneiden ollessa kyseessä, hidastankkaus eli paineistus tankkaamisen yhteydessä sopii siinä tapauksessa, että työkoneen tankki on riittävän suuri ja että kompressori on riittävän tehokas, jotta päivän polttoainetarve saadaan tankattua yön aikana. Tällaisen tankkausaseman pääkomponentti on kompressori.

Pienen mittakaavan hidastankkausasemia valmistaa esimerkiksi FuelMaker [24]. Tuotteet ovat:

- kotikäyttöön
 - o Phill (Kuva 10)
 - virtaus 1,5 Nm³/h
 - sähkön kulutus 0,8 kW/h
 - Paineistus sisään 17-35 mbar, ulos 207 bar.
- kaupalliseen käyttöön
 - o FMQ 2.5
 - virtaus 3 Nm³/h
 - sähkön kulutus 1,2 kWh
 - Paineistus sisään 17-35 mbar, ulos 207 bar.
 - o FMQ 10
 - virtaus 12 Nm³/h
 - sähkön kulutus 3,6 kW/h
 - Paineistus sisään 18-110 mbar, ulos 207 bar.



Kuva 10. Kotitankkausasema. [25]

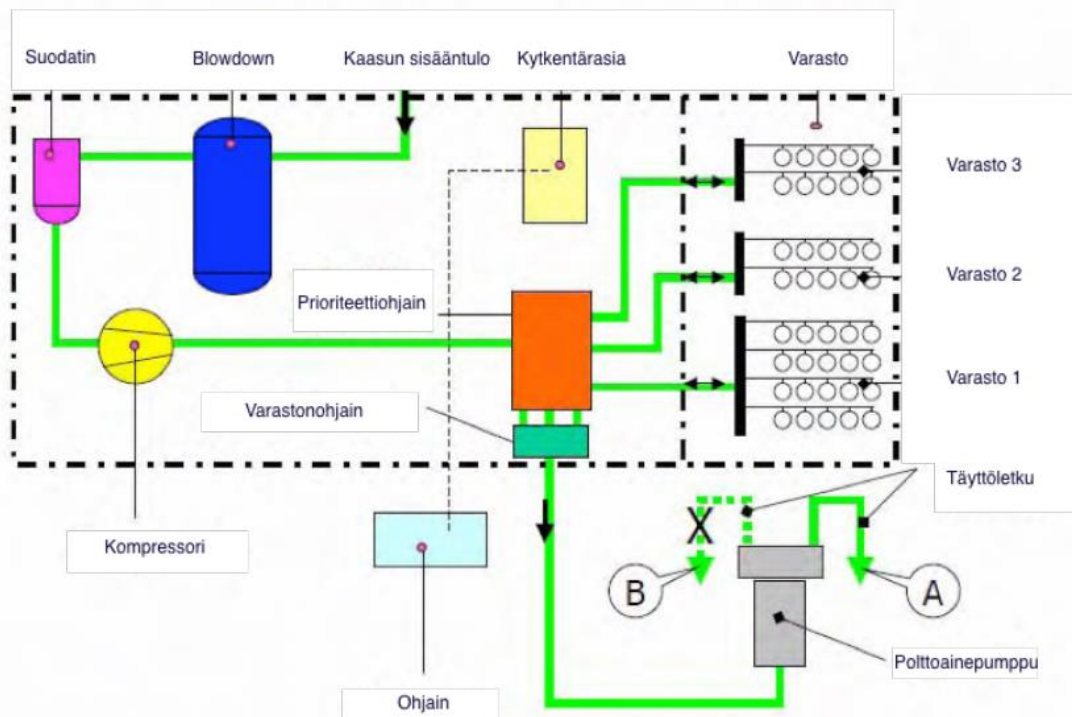
Hinta esimerkiksi mallille BRC Fuelmaker FMQ-2-36 Yhdysvalloissa on 7621 € (Taulukko 8).
Hinta ei sisällä tankkausletkua eikä suutinta. [25]

Taulukko 8. Tekniset tiedot BRC Fuelmaker FMQ-2-36. [25]

	BRC Fuelmaker FMQ-2-36
Dimensions	540x500x990mm
Weight	66kg
Operating temperature	-40°C to +45°C
Power supply	220Volt
Average electric consumption	1.4 kwh
Inlet pressure	17-35 mbar
Outlet pressure	248 bar/3.600 psig
Flow	2.5 Nm ³ /h
Sound emission level	49dBA a 5mt

3.1.3.2 Nopeatankkausasema

Jos kaasu on varastoitu korkeassa paineessa, ei nopeatankkausasemaa varten tarvita korkeapaineisen kaasusäiliön lisäksi muuta kuin venttiili, tankkausletku ja suutin. Usein tankkausasema on kuitenkin toteutettu kolmella eripaineisella kaasuväylällä (Kuva 11). Ajoneuvon tankkaus aloitetaan matalapainevarastosta, ja virtauksen pienentyessä varastonohjain vaihtaa ensin yhteyden keskipainevarastoon ja lopuksi vastaavasti korkeapainevarastoon. Tankkausasemia on tehty myös kahdella väli-varastolla. Käyttökustannukset ovat suurempia kahden väli-varaston ratkaisussa verrattuna kolmen varaston tankkausasemaan, mutta investointikustannukset pienemmät. [26]



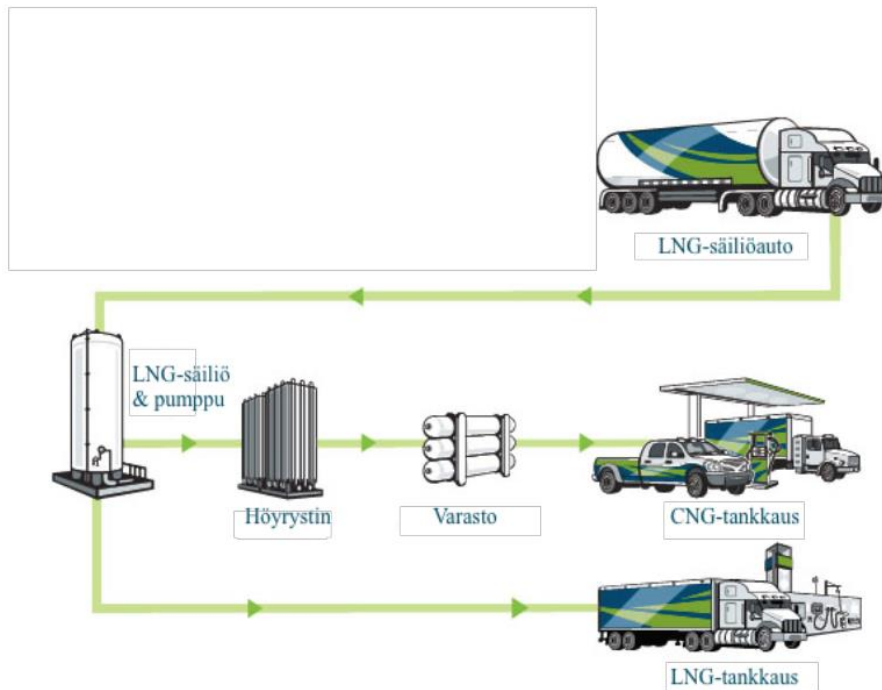
Kuva 11. Esimerkki CNG-nopeatankkausasemasta. [23]

Hinterberger arvio kapasiteetiltaan 50 m³/h nopeatankkausaseman investointikustannuksen olevan 0,134 M€. Kustannusjakauma on esitetty alla Taulukko 9:ssä. [26]

Taulukko 9. Esimerkki nopeatankkausaseman kustannusjakaumasta. [26]

Kompressori (50 Nm ³ /h)	79 000 €
Kaasuvarasto	25 000 €
Tankkausautomaatti	24 470 €
Tankkauspumppu + tarvittavat putket	13 000 €

Nesteytetyn metaanin tankkaamiseen paineistettuna kaasumaisena metaanina (LCNG-tankkausasema, Kuva 12) tarvitaan höyrystin, varasto ja jakelulaite. Eräs hinta-arvio LCNG-tankkausasemalle (800 Nm³/h) oli 450 000 €. Hinta sisälsi laitteiston, jossa nestefaasissa olevan metaanin paine nostetaan tankkauspaineeseen kryogeenisellä mäntäpumpulla, höyrystyslaitteen ja kaasun pienen välivaraston. Sen sijaan hinta ei sisältänyt nesteytetyn metaanin varastosäiliötä. [23]



Kuva 12. Esimerkki LNG-LCNG -tankkausasemasta. [23]

3.2 Biometaanin varastointi ajoneuvoissa

Ajoneuvoissa metaani varastoidaan joko neste- tai kaasufaasissa. Nestemäinen metaani varastoidaan joko normaalia ilmanpainetta vastaavaan tai lievästi korotettuun paineeseen kryogeenisena nesteenä. Kaasumaisena varastoitu metaani säilötään ajoneuvoissa tyypillisesti 200 - 260 bar paineeseen lieriön muotoisiin säiliöihin standardin EN ISO 16923:2018 mukaisesti.

3.2.1 Nestemäisen metaanin säilöntäratkaisut

Nestemäistä metaania käyttävät tyypillisesti kuorma-autot. Henkilöautoissa tai muissa ajoneuvoissa joissa käyttö on satunnaista ei nestemäistä metaania voi käyttää johtuen nestemäisen metaanin höyrystymisen seurauksena syntyvästä kaasumaisesta metaanista joka täytyy päästää säiliöstä pois. Kuorma-autoissa höyrystynyt metaani ohjataan välisäilöön ja sieltä moottorille poltettavaksi. Tämän tyyppinen ratkaisu toimii silloin kun seisokit ovat lyhyehköjä. Boil-offista johtuen nestemäistä metaania ei voida säilöä pitkiä aikoja jolloin, esim. ajoneuvokäytössä (työkoneet yms.) jossa käyttö ei ole joka päiväistä, ei LNG/LBG:tä voi käyttää.

3.2.2 Kaasumaisen metaanin säilöntäratkaisut

Henkilöautoissa ja työkoneissa käytetään pääsääntöisesti paineistettua metaania. Paineistettua metaania käytetään myös kuorma-autoissa ja kaupunkibusseissa. Täyttöpaine on tyypillisesti 200 - 260 bar. Paineistetun metaanin säiliöitä varten on yleisesti käytössä oleva neliportainen jaottelu painesäiliön materiaalien perusteella. Taulukko 10:ssä on kuvattu tällä hetkellä yleisesti käytössä olevat säiliötyypit ja niiden materiaalit. Tyyppien luokitus nousee yhdestä neljään vähenevän säiliön teräspitoisuuden mukaan. Tyyppin I säiliöt ovat täysin teräsvalmisteisia ja tyyppin IV säiliöt ovat täysin metallivapaita rakenteita. Tyyppin V säiliö on uusin vuonna 2013 luokituksen saanut tyyppi ja koostuu täysin komposiittimateriaaleista.

Taulukko 10: Paineistetun metaanin säiliötyypit ja suhteellinen massa. [27], [28]

Tankin tyyppi	Massa/tankin tilavuus [kg/L] ²	Massa suhteessa terästankkiin
Tyyppi I - CrMo teräs	0,80	-
Tyyppi I - opt. CrMo teräs	0,72	90 %
Tyyppi II - teräs & lasikuitu	0,68	85 %
Tyyppi II - teräs & hiilikuitu	0,52	65 %
Tyyppi III - teräs & hiilikuitu	0,41	52 %
Tyyppi III - alumiini & hiilikuitu	0,50	62 %
Tyyppi IV - polymeeri & lasi/hiilihybridi	0,33	41 %
Tyyppi IV - polymeeri & hiilikuitu	0,24	30 %
Tyyppi V - komposiitti	0,19 - 0,22	24 % - 27 %

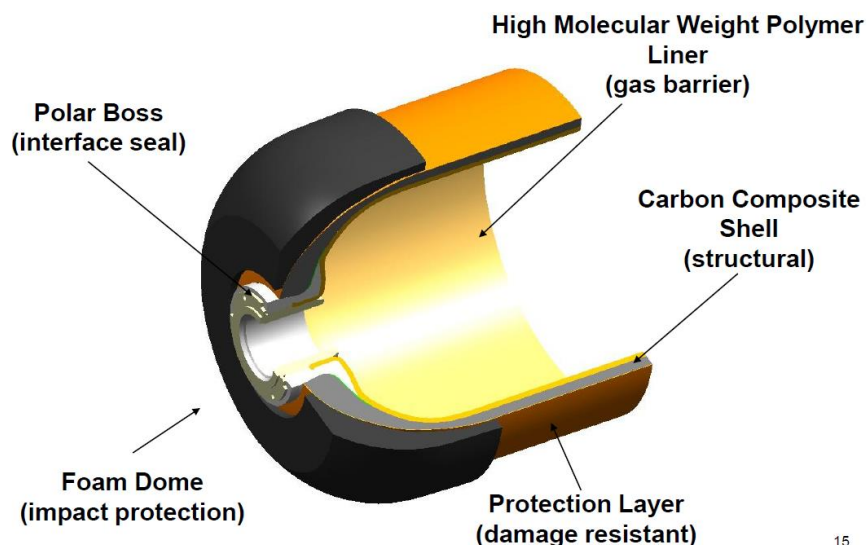
Tyyppin I - V säiliöt ovat muodoltaan pääosin lieriömäisiä, joissa pituuden suhde halkaisijaan on tyypillisesti hyvin suuri. Tyyppin III säiliössä, Kuva 13, on säiliön sisäkuori tyypillisesti terästä tai alumiinia ja ulkokuori on kauttaaltaan komposiitilla vahvistettu. Tyyppin III säiliöllä saavutetaan noin 40 - 50 % säästö säiliön massassa suhteessa tyyppin I säiliöön.

² Arviossa tarkastelukohteena noin 140 L tankki.



Kuva 13: Esimerkki tyypin III CNG säiliöstä. [29]

Tyypin IV säiliöillä saavutetaan sama metaanin säilöntäkapasiteetti noin 70 % pienemmällä massalla kuin tyypin I säiliöillä. Tyypin IV säiliöissä käytetään yleisesti sisäkuoren materiaalina polymeeriä ja ulkokuorena joko lasi-hiilihybridiä tai täysin hiilikuitua. Kuva 14:ssä on havainnekuva rakenteesta.



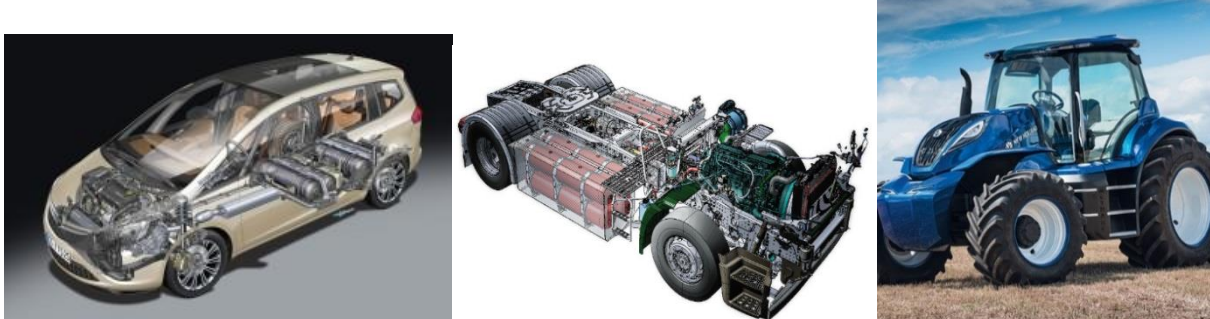
15

Kuva 14: Tyypin IV CNG säiliön rakenne-esimerkki. [28]

Säiliötyyppien kustannuksiin vaikuttavat pääosin materiaali ja valmistusmenetelmät. Tyypin I säiliön materiaali ja valmistusmenetelmien osaaminen ovat laajalle levinneitä ja pitkälle kehittyneitä. Tyypin I säiliöt ovat kustannuksiltaan (€ / litra) pienimmät. Tyypin IV säiliöt ovat valmistuskustannuksiltaan korkeimmat pääosin johtuen vaativasta valmistusmenetelmästä. Kappaleessa 3.1.1.2 esitetyssä Taulukko 4:ssä on esitetty kustannusarviot eri säiliötyypeille.

Paineistetun metaanin varastoiminen ajoneuvossa on haastavampaa kuin esimerkiksi dieselpolttoaineen johtuen paineistetun metaanin matalammasta energiatiheydestä [MJ/l] joka on 200 - 250 bar paineessa noin 20 - 25 % dieselpolttoaineen energiatiheydestä. Tämä tarkoittaa esimerkiksi sitä, että CNG vaatii 4 - 5 kertaa suuremman tilavuuden polttoainesäiliöltä kuin diesel saman energiamäärän saavuttamiseksi. Ajoneuvoissa

tyypillisesti käytetään usean Tyypin I-IV lieriön muotoisen säiliön muodostamia pattereita, jotka sijoitetaan ajoneuvon rakenteisiin. Kuva 15:ssä on esimerkki säiliöiden sijoittelusta henkilöautossa, kuorma-autossa ja traktorissa. Kuvan traktorissa säiliöt ovat sijoitettu molemmille puolille etu- ja taka-akselin väliin ohjaamoon johtavien rappusten taakse sekä etuakselin etupuolella olevaan etupainoon.



Kuva 15: Ajoneuvojen tyypillisiä CNG säiliöratkaisuja [30], [31], [32].

Osassa ajoneuvoista, esimerkiksi jotkin työkonet, isokojen lieriön muotoisten säiliöiden sijoittelu on melko haastavaa. Viime aikoina markkinoille on tullut uusia ratkaisuja, joiden avulla painesäiliöt voidaan sijoitella vapaammin ajoneuvon rakenteisiin ja näin hyödyntää säiliön varaama tila tehokkaammin. Kuva 16:ssä on Westport:n Tyypin IV säiliö joka muodostuu useasta pienestä lieriöstä jotka ovat yhdistetty toisiinsa mahdollistaen joustavan säiliön sijoittamisen.



Kuva 16: Westport yrityksen FIT PACK CNG säiliö. [33]

Pääosa CNG säiliöstä on lieriön muotoisia. Lieriön muotoinen säiliö on kuitenkin varaamansa tilan osalta suorakaiteen muotoista rakennetta epäedullisempi, teoriassa se täyttää alle 80 % varaamastaan suorakaiteen muotoisesta tilavuudesta³. REL on kehittänyt CNG säiliön joka koostuu laatikon sisällä olevista putkistoista, Kuva 17. REL kertoo säiliön energiatihedden olevan 20 - 35 % suurempi kuin perinteisen lieriön muotoisen säiliön. [34]

³ Lieriön päät oletettu suoraseinäisiksi. Todellisuudessa vähintään toinen lieriön muotoisen tankin pää on puolipallon muotoinen, jolloin tilavuus suhteessa lieriön varaamaan suorakaiteen muotoiseen tilavuuteen on selkeästi alle 80 %.



Kuva 17: REL Inc. suorakaiteen muotoinen CNG säiliö [34].

UTRC (United Technologies Research Center) on kehittänyt vastaavanlaisen suorakaiteen muotoisen CNG säiliön, Kuva 18. Säiliö koostuu kahdesta ulkopuolisesta D-muotoisesta kammioista, joiden sisällä on vapaa valintainen määrä ”stadionin” muotoisia sisäkammioita. UTRC kertoo säiliön energiatihedysten olevan 30 % suurempi kuin perinteisen lieriön muotoisen säiliön. [35]



Kuva 18: UTRC:n kehittämä suorakaiteen muotoinen CNG säiliö. [35]

4. Tulevaisuuden varastointiteknologiamahdollisuuksia

Metaanin kuten myös muiden kaasujen varastointiin on viime vuosina kehitetty uudenlaisia säilöntäratkaisuja kasvattamaan varastoidun kaasun energiasisältöä [$\text{MJ}/\text{m}^3_{\text{eff.}}$] sekä laskemaan varastoinnin kustannuksia suhteessa perinteiseen korkeapainesäilöntään. Erityisesti Yhdysvalloissa on 2000-luvulla tutkittu ja kehitetty ajoneuvokäyttöön uusia metaanin varastointiratkaisuja. Uudet kehittyneet varastointiratkaisut voidaan jaotella karkeasti kahteen ryhmään:

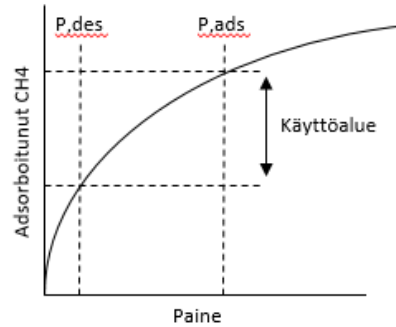
1. Paineistetun metaanin (250 bar) varastointi monimutkaisen geometrian omaavaan säiliöön.
2. Metaanin varastointi huokoisten materiaalien pinnalle, jolle käytetään englanninkielistä nimitystä Adsorbed Natural Gas (ANG)

Kappaleessa 3.2.2 esitettiin muutamia uusia paineistetun metaanin säilöntäratkaisuja, joilla on mahdollista hyödyntää erityisesti ajoneuvokäytössä polttoainetankin varaama tila tehokkaammin. Tässä kappaleessa keskitytään kehitysnäkymiin metaanin varastoinnissa huokosiin materiaaleihin.

Metaanin varastointi huokoisten materiaalien pinnalle on verrattaen nuori tutkimuksen kohde. Tutkimuksen alku sijoittuu 1980-luvun alkuun, jonka jälkeen erilaisia huokoisia materiaaleja kuten zeolittejä, aktivoituja hiiliä, hiilinanoputkia, kovalenttisia orgaanisia runkoja (COF), huokoisia orgaanisia polymeerejä (POP) ja huokoisia metalliorgaanisia runkoja (MOF) on tutkittu aktiivisesti ilman teknologian kaupallista läpimurtoa [36]. Keskeinen hyöty adsorbtiosta verrattuna CNG:hen on se, että voidaan käyttää matalampia painetasoja saman energiasisällön (MJ/m^3) saavuttamiseksi, tyypillisesti alle 100 Bar.

Ajoneuvokäyttöä ajatellen adsorbenttien suorituskyky riippuu lähinnä tilavuuspohjaisesta metaanin sidontakapasiteetista. Alhasan et al on koontanut useasta kirjallisuuskäytöstä eri aineiden metaanin sidontakapasiteetteja ja parhaat adsorbentit sijoittuvat itseensä noin $200 \text{ Nm}^3_{\text{CH}_4}/\text{m}^3_{\text{adsorbentti}}$ noin 28 baarin (400 PSI:n) paineessa. [37]

Merkittävimmät haasteet ovat liittyneet aikaisempien huokoisten materiaalien ominaisuuteen sitoa metaania voimakkaasti matalilla painetasoilla (< 1 bar) ja paineen kasvaessa lisä metaanin sitoutumista on ehkäissyt CH_4 - CH_4 molekyylien heikko keskinäinen vuorovaikutus. [38] Kuva 19:sta havainnollistetaan tyypillistä ANG teknologian metaanin sitoutumista paineen funktiona vakio lämpötilassa. Metaanin sitoutuminen vakio lämpötilassa paineen funktiona noudattaa isotermikäyrää, jossa metaania sitoutuu suhteellisesti merkittävästi matalilla painetasoilla ja paineen noustessa sitoutuminen pienenee. [39] Vastaavasti metaanivarastoa purettaessa (desorbtiio) vapautuu metaani enemmän matalilla painetasoilla. Tämän seurauksena efektiivinen metaanimäärä ts. käyttöalue jää hyvin pieneksi johtuen siitä, että metaanivaraston matalin toimintapainetaso (p_{des}) määräytyy käyttökohteen mukaan. Ajoneuvokäytössä kaasutarvasta vaadittu alin painetaso on luokkaa 5 - 8 bar riippuen järjestelmästä, jotta ajoneuvon kaasujärjestelmä toimii oikein.



Kuva 19: Tyypillinen Langmuir-tyyppinen isotermi adsorbtiokäyrä.

Toinen haaste liittyy siihen, että myös lämpötila vaikuttaa kaasun sitoutumiseen ja vapautumiseen. Kaasun adsorboituessa vapautuu lämpöä, jolloin metaanin sidontakapasiteetti alenee. Metaanin vapautuminen taas vaatii lämpöä: mitä kylmempää adsorbtiointia on, sitä enemmän siihen jää metaania. Yksi tapa vähentää tätä ongelmaa on varustaa säiliö lämmönsiirtimellä.

Taulukko 11:ssä on esitetty vuoden 2016 state-of-the-art MOF rakenteita ja niiden metaanin adsorbtiio-ominaisuuksia huoneenlämmössä (25 °C) ja 65 bar paineessa sekä niin kutsuttu "working capacity" jota suomeksi voidaan kutsua käyttöalueeksi.

Seuraavissa kappaleissa 4.1 - 4.6 esitellään lupaavimpien ANG rakenteiden POP, MOF, aktiivinen hiilirakenne sekä metaanihydraatin (metaani ei adsorboitunut vaan varastoitunut kidehilassa) hyviä ja huonoja puolia sekä metaanin sidontakykyä.

Taulukko 11: Pinnan ala, huokoinen tilavuus ja metaanin varastointiominaisuuksia vuoden 2016 state-of-the-art huokoisille materiaaleille huoneenlämmössä (293 K) ja 65 bar tai 35 bar. [36]

Adsorbent Types	Materials	S_{BET} ($m^2 g^{-1}$)	V_p ($cm^3 g^{-1}$)	Absolute Uptake ^a		Working Capacity ^b		Reference
				g/g	$cm^3 cm^{-3}$	g/g	$cm^3 cm^{-3}$	
DOE targets	–	–	–	0.5	350	–	–	DOE MOVE program ⁴
Zeolites	5A	–	0.20	(0.050)	(104)	–	–	Rolniak and Kobayashi ⁶¹
	13X	–	0.27	(0.053)	(106)	–	–	Menon and Komameni ⁶²
	CaX	–	0.36	(0.082)	–	–	–	Zhang et al. ⁶³
	MgY	–	–	(0.062)	–	–	–	Talu et al. ⁶⁴
Carbons	AX-21	4,880	1.64	0.298 (0.225)	203 (153)	0.225 (0.151)	153 (103)	Mason et al. ¹⁶
	LMA-405	3,551	1.00	0.264 (0.213)	166 (134)	0.215 (0.164)	135 (103)	Casco et al. ⁶⁵
	LMA-738	3,290	1.10	0.296 (0.222)	220 (165)	0.234 (0.160)	174 (119)	Casco et al. ⁶⁵
	LMA-726	3,425	1.11	0.277 (0.210)	206 (156)	0.215 (0.148)	160 (110)	Casco et al. ⁶⁵
COFs	COF-5	1,670	1.07	0.115 (0.089)	93 (72)	0.092 (0.066)	74 (53)	Furukawa and Yaghi ⁶⁶
	COF-8	1,350	0.69	0.108 (0.087)	107 (86)	0.085 (0.064)	84 (63)	Furukawa and Yaghi ⁶⁶
	COF-102	3,620	1.55	0.238 (0.187)	145 (114)	0.202 (0.151)	123 (92)	Furukawa and Yaghi ⁶⁶
	COF-103	3,530	1.54	0.222 (0.175)	135 (107)	0.188 (0.141)	114 (86)	Furukawa and Yaghi ⁶⁶
POPs	PPN-2	1,764	1.26	0.142 (0.109)	–	0.111 (0.078)	–	Lu et al. ⁶⁷
	PPN-3	2,864	1.70	0.186 (0.141)	–	0.150 (0.105)	–	Lu et al. ⁶⁷
	PPN-4	6,461	3.04	0.389 ^c (0.274)	155 ^c (109)	0.346 (0.231)	138 (92)	Yuan et al. ⁶⁸
	PPN-13	3,420	2.05	0.179 (0.111)	–	0.124 (0.086)	–	Lu et al. ⁶⁹
MOFs	NiMOF-74	1,350	0.51	0.148 (0.135)	251 (228)	0.077 (0.063)	129 (106)	Peng et al. ²⁵
	MAF-38	2,022	0.81	0.247 (0.213)	263 (226)	0.176 (0.141)	187 (150)	Lin et al. ⁷⁰
	HKUST-1	1,850	0.78	0.216 (0.184)	267 (227)	0.154 (0.122)	190 (150)	Peng et al. ²⁵
	UTSA-76	2,820	1.09	0.263 (0.216)	257 (211)	0.201 (0.154)	197 (151)	Li et al. ²⁶
	Co(bdp)	2,911	1.02	–	203 (161)	–	197 (155) ^d	Mason et al. ²⁷
	Al-soc-MOF-1	5,585	2.30	0.414 (0.259)	197 (123)	0.370 (0.218)	176 (104)	Alezi et al. ³⁸
MOF-210	6,240	3.60	0.410 (0.238)	143 (83)	0.376 (0.204)	131 (71)	Furukawa et al. ⁷¹	

^aAt RT and 65 (35) bar.

^bDefined as the difference in methane uptake between 65 (35) and 5 bar.

^cAt 55 bar.

^dBetween 65 (35) and 5.8 bar.

4.1 Huokoiset orgaaniset polymeerit (POP)

Huokoiset orgaaniset polymeerit ovat polymeerirakenteita joissa synteettisellä polymerisoinnilla on muodostettu mahdollisimman huokoisia rakenteita. POP rakenteen merkittävimmät edut ovat: [40]

- mahdollisuus muodostaa kevyitä rakenteita
- suuri joukko tunnettuja synteettisiä valmistuspolkuja
- polymeerit ovat kemiallisesti ja termisesti stabiileja
- polymeerit voidaan syntetisoida suoraan ”monoliittiseen” muotoon

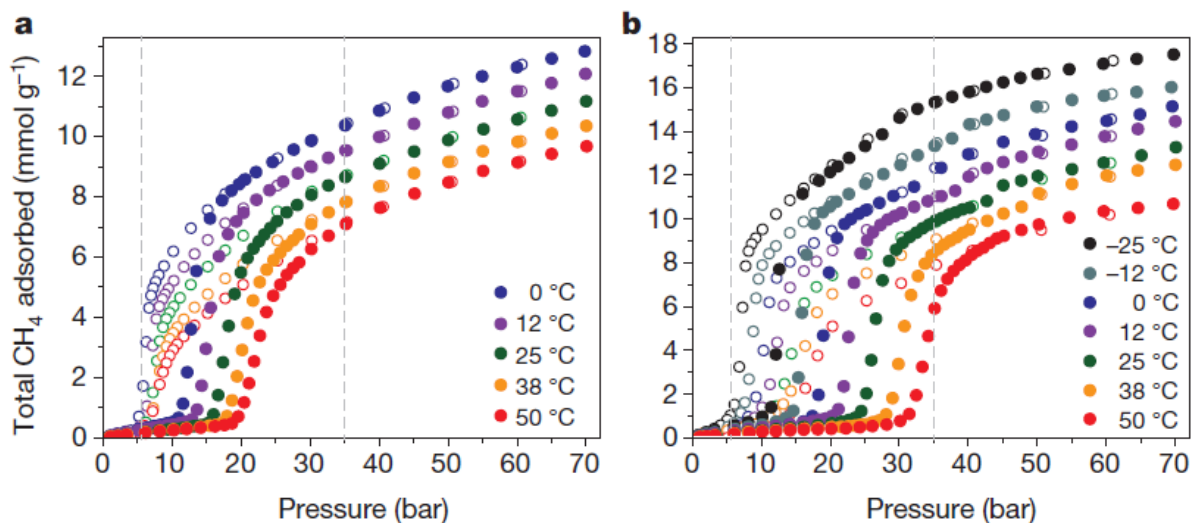
Yllä olevien ominaisuuksien lisäksi POP rakenteet sietävät myös hyvin vettä ja niillä on suuri pinta-ala suhteessa massaan (jopa 6500 m^2/g). Useiden tunnettujen monomerointimenetelmien ansiosta POP rakenteita voidaan muokata tehokkaasti geometrialtaan ja topologialtaan siten, että materiaalin huokoisuus saadaan kasvatettua mahdollisimman suureksi hyödyntäen samalla käyttökohteen tilavaatimukset mahdollisimman tehokkaasti. Näiden ominaisuuksien johdosta huokoisilla orgaanisilla polymeerirakenteilla on mahdollista saavuttaa suhteellisen suuri gravimetrinen ($g_{ch4}/g_{adsorbent}$) metaanin adsorbtiokyky kuten materiaalilla PPN-4, Taulukko 11. [36], [38], [40]

Tämän hetkisten huokoisten orgaanisten polymeerirakenteiden merkittävimpänä ongelmana on niiden matala tiheys, jonka seurauksena volumetrinen metaanin adsorbtiokyky ($V_{CH_4}/V_{adsorbent}$) jää matalaksi, kts. Taulukko 11.

4.2 Metalliorgaanisiet rungot (MOF)

Metalliorgaanisten runkojen (MOF) tutkiminen on verrattain uusi ANG teknologian ala ja niiden tutkiminen on saavuttanut suurta huomiota vasta viimeisen kahden vuosikymmenen aikana. [38] MOF rakenteet muodostuvat metallikationien tai klusterien ja siltana toimivien orgaanisten atomien muodostamasta verkostosta rakenteen jonka ”huokoihin koloihin” metaanimolekyylillä pääsee sitoutumaan adsorbtioiden aikana. [36], [38], [41] Ne tarjoavat suuren materiaalin pinta-alan, muokkailtavissa olevan pintarakenteen huukoisine koloina sekä monipuoliset kemialliset ominaisuudet. Näiden ominaisuuksien johdosta MOF rakenteet muodostavat tällä hetkellä yhden lupaavimmista rakenteista metaanin adsorbtiioon.

Tyypillisesti ANG materiaalien metaanin adsorbtiokäyrä muokkalee Kuva 19:n mukaista metaanin sitoutumista sorbenttiin. Tällöin merkittävä osa metaanista sitoutuu jo alle 10 bar painetasolla. Ajoneuvokäytössä tämän painetaso alapuolelle jäävää metaania ei saada hyödynnettyä, jolloin adsorboituneen metaanin käyttöalue jää pieneksi. Mason et. al. esitteli tutkimuksessaan kaksi eri MOF rakennetta joilla on mahdollista rakentaa S-muotoinen tai askelmainen metaanin sitoutumisisotermi hyödyntäen rakenteen mahdollistamaa ”gate opening” käytöstä (rakenteen huukoiset aukot laajentuvat/aukeavat vasta metaanin paineen saavutettua kynnyspainetaso). Kuva 20:n on kuvattu kahden eri MOF rakenteen metaanin adsorbtiokykyä eri isotermeillä. Esimerkiksi rakenteen CO(bdp) osalta ”gate opening” ilmiö mahdollistaa metaanin adsorbtiota ja desorbtiota ”kynnyspainetaso” nostamisen 0 °C:n lämpötilassa 10 bar tasolle ja vastaavasti 5 bar tasolle ja 50 °C lämpötilassa 20 bar ja noin 5 bar tasolle.



Kuva 20: CO(bdp) (kuva a) ja Fe(bdp) metalliorgaanisten runkojen S-muotoinen tai askelmainen metaanin adsorbtiolisotermi. Täytetty ympyrä kuvaa adsorbtiota ja täyttämätön desorbtiota. [39]

MOF rakenteilla saavutetaan tällä hetkellä suurin metaanin adsorbtiokyky 65 bar painetasolla. Taulukko 11:sta on esitetty vuoden 2016 tilanteessa lupaavimmat MOF materiaalit ja niiden metaanin adsorbtiio-ominaisuuksia.

Nykyisten MOF rakenteiden merkittävimpänä haasteena on niiden rakenteen heikko sietokyky ulkoista mekaanista painetta vastaan, kemiallinen epästabiilitetti (kristallirakenne vioittuu herkästi) ja herkkyys CNG:n mukana olevia epäpuhtauksia ja vesihöyryä vastaan. [36], [42]

Lisäksi metaanin adsorbtiokyky nousee rajuisimmin noin alle 100 bar painetasoilla ja sen jälkeen selkeästi maltillisemmin kuin esim. aktiivisilla hiilirakenteilla, joilla adsorbtiokyky nousee edelleen suhteellisen voimakkaasti. Li et. al. esittivät julkaisussaan tutkimustuloksia HKUST-1 rakenteen adsorbtiokyvyn kasvusta paineen noustessa 65 bar:sta 100 bar paineeseen. Metaanin adsorbtiokasvot vain $267 \text{ cm}^3_{\text{CH}_4}/\text{cm}^3$:sta $279 \text{ cm}^3_{\text{CH}_4}/\text{cm}^3$:n. Li et. al. esittivät myös tuloksia adsorbtiokyvyn muutoksesta lämpötilan funktiona. Adsorbtiolämpötilaa laskettaessa 298 K:stä 270 K:n nousee metaanin adsorbtiomäärä $267 \text{ cm}^3_{\text{CH}_4}/\text{cm}^3$:sta $301 \text{ (STP}^4) \text{ cm}^3/\text{cm}^3$:n 65 bar paineella. [36]

Fang et. al. esittelivät vuonna 2018 julkaisemassaan tutkimuksessa uuden tyyppisen MOF materiaalin PCN-250 joka perustuu rautaklustereiden ympärille rakennettuun runkoon. PCN-250 materiaalin hyviksi ominaisuuksiksi he kertovat selkeästi paremman kemiallisen stabiiliteetin joka mahdollistaa kristallirakenteen ja pinnan alan säilymisen jopa kiehuvaan vedessä (100 °C ja 1 atm) sekä laajalla pH-alueella. Lisäksi PCN-250 materiaalin rakenne mahdollistaa edullisen valmistuksen. Tutkimuksessaan Fang et. al. seostivat PCN-250 rakennetta materiaalin synteessin jälkeen n-dekaanilla jonka seurauksena rakenteen huokoisuus kasvoi. Uudella rakenteella saavutettiin $203 \text{ (STP)} \text{ cm}^3_{\text{CH}_4}/\text{cm}^3$:n metaanin adsorbtiokasvot 65 bar paineella. [42]

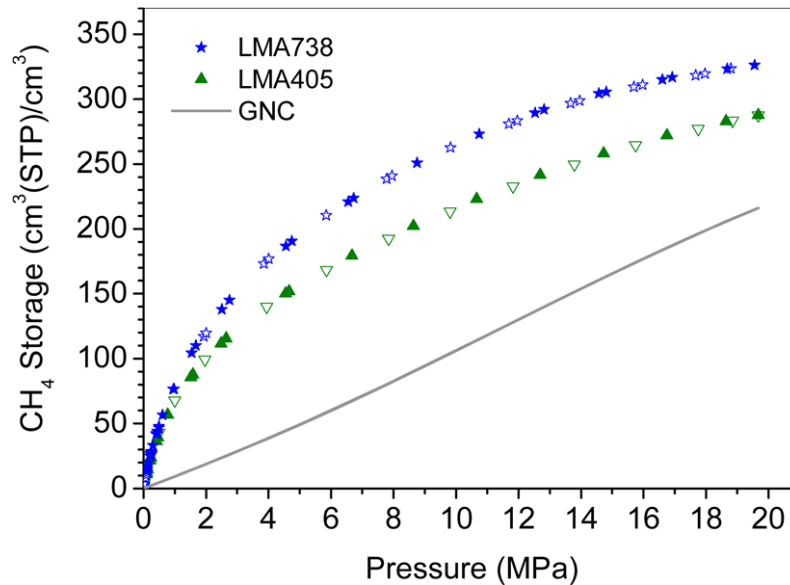
4.3 Aktiiviset hiilirakenteet

Aktiiviset hiilirakenteet ovat olleet yksi tutkituimmista materiaaleista/rakenteista metaanin varastoisiksi. Hiiliperäisiä materiaaleja esim. aktivoituja hiiliä voidaan valmistaa hapon avulla synteettisesti kemiallisen aktivoinnin kautta tai hapon avulla perustuen useisiin luonnon materiaaleihin kuten puu, antrasiitti, polymeerit tai maatalouden jäännöstuotteet. [36], [38]

Aktiivihiihtä voi tuottaa kaksivaiheisella prosessilla. Ensimmäisessä vaiheessa suoritetaan hiilto tai hidas pyrolyysi kuumentamalla biomassaa tai muuta raaka-ainetta noin 300-500 °C lämpötilassa hapettomassa tilassa 10-120 minuutin ajan. Seuraavassa vaiheessa saatu hiili aktivoidaan, niin että hiileen muodostuu runsaasti huokosia, jolloin hiileen muodostuu iso pinta-ala ja adsorbtiokyky. Tämä voidaan tehdä joko kemiallisen aktivoinnin avulla, käyttäen kemikaaleja esim. H_2SO_4 , H_3PO_4 , KOH , ZnCl_2 , CaCO_3 ja K_2CO_3 noin 450-750 °C lämpötilassa tai fysikaalisen aktivoinnin avulla korkeammassa yli 700 °C lämpötilassa käyttäen vesihöyryä. Jotta saatu aktiivihiihi voi sitoa hyvin metaani siinä täytyy olla paljon pienikokoisia huokosia eli mikrohuokosia. [43]

Aktivoitujen hiilien hyvänä puoleena on niiden hyvä sietokyky mekaanisesta kuormituksesta johtuvaa painetta vastaan menettämättä metaanin adsorbtiokykyä ja vaikutusta adsorbtiokäyttöön (hystereesi adsorbtiodesorbtiio). Tämän johdosta esim. ajoneuvokäyttöön tarkoitettujen kaasutankkien valmistaminen on aktiivisista hiilirakenteista tällä hetkellä MOF rakenteita edullisempaa. Kuva 21:ssä on esitetty vuonna 2015 lupaavimpien aktiivisten hiilirakenteiden LMA738 ja LMA405 metaanin adsorbtiokyky suhteessa tavalliseen paineistettuun maakaasuun.

⁴ STP = Standard temperature and pressure (273,15 K ja 1 bar)

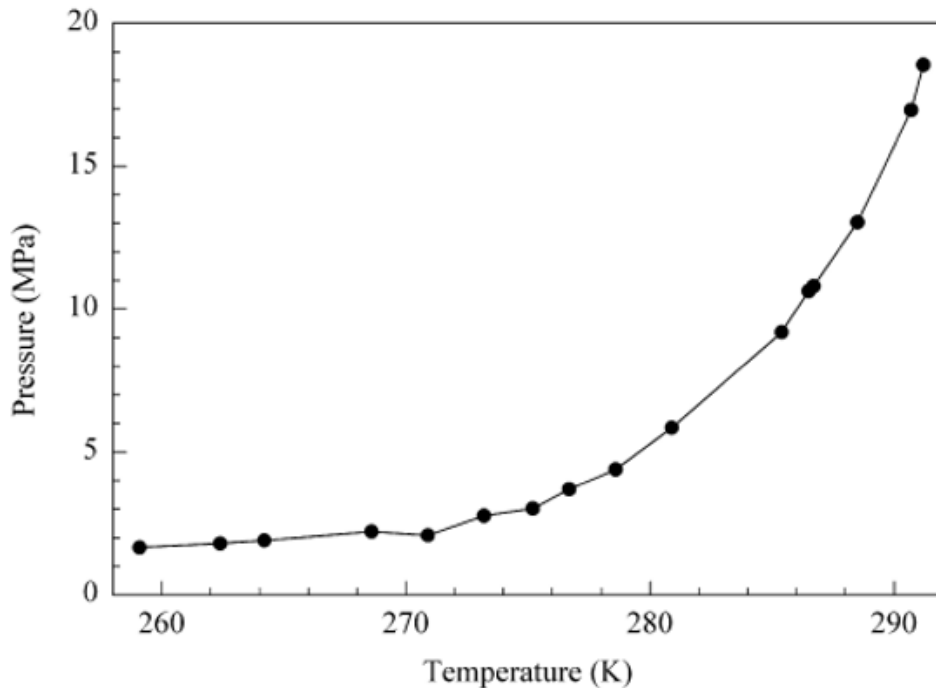


Kuva 21: Lupaavimpien (vuonna 2015) aktiivisten hiilirakenteiden (LMA738 ja LMA405) metaanin adsorptiokyky 298 K. Verrokkina on perinteinen CNG. [44]

Aktivoitujen hiilien käytön haasteena on rajoitukset huokoisen rakenteen kokojakauman muokkaamisessa, käytävissä olevan pinta-alan, huokosten tilavuuden sekä pinnan funktionalisoimisessa. MOF rakenteilla ei ole vastaavia rajoitteita, vaan niiden huokoisuutta ja "kolojen" ominaisuuksia voidaan muokata aktiivisia hiiliä helpommin. [36], [41]

4.4 Metaanihydraatit

Kaasuista metaani, etaani, propaani sekä hiilidioksidi muodostavat jäätä muistuttavia kiinteitä yhdisteitä yhdessä veden kanssa hydraattien tai klatraatin muodossa. Metaanihydraateissa ja klatraateissa metaani on sitoutunut rakenteeseen muodostaen kidehilan. Näin ollen metaani ei ole itse asiassa adsorboituneena. Tässä kuitenkin esitellään metaanihydraatit yhtenä vaihtoehtona metaanin sitouttamisesta kiinteään aineeseen. Metaanihydraatit ja klatraatit esiintyvät yleensä alhaisissa lämpötiloissa ja korkeassa paineessa. Hydraatteja ja klatraatteja esiintyy myös luonnossa kylmissä olosuhteissa. Metaanihydraattia saattaa muodostua myös maakaasuputkissa kylmissä olosuhteissa, mikäli maakaasu sisältää vettä. Metaanihydraatilla on kohtuullisen suuri metaanin sitomiskyky sitoen jopa 180 kertaisen määrän metaania suhteessa tilavuuteensa [$V_{\text{CH}_4}/V_{\text{hydraatti}}$]. Metaanihydraattia voidaan säilyttää ilmankehän paineessa -20 °C:n lämpötilassa. Säilytyslämpötilan noustessa täytyy myös painetta nostaa jotta metaanihydraatti säilyy stabiilina. Kuva 22:ssa on esimerkki metaanihydraatin tasapainokäyrästä. Metaanihydraatilla on suuri adsorptio ja desorptiolämpö, joka heikentää sen käytettävyyttä metaanin kiinteään säilönnän ratkaisuna. [45]



Kuva 22: Metaanihydraatin tasapainokäyrä lämpötilan funktiona [45].

Metaanihydraateissa haasteena on ollut lämmönsiirto ja metaanihydraattien hidas muodostuminen. Metaanin hydraatin muodostumisnopeus myös hidastuu säiliökokoja kasvatettaessa johtuen aineensirrosta, jolloin säilöntätilavuuden kasvattaminen on haastavaa. Metaanihydraatin muodostumisen nopeuttamiseksi korkeammissa lämpötiloissa jäädytystarpeen laskemiseksi on kokeiltu erilaisia prosessia edistäviä aineita kuten orgaanisia liuottimia ja pinta-aktiivisia aineita. Käyttämällä apuaineena tetrahydrofuraania liuotinta (THF) 5,56 mol-% on saatu lupaavia tuloksia. Veluswamy et. al. onnistuivat adsorboimaan metaania noin 115 $[V_{\text{CH}_4}/V_{\text{hydraatti}}]$ normaalissa ilman paineessa ja noin 0 °C lämpötilassa. Tämä vastaa energiatihedeltään CNG varastointia noin 9 MPa paineessa. Veluswamy et. al. suorittivat tutkimuksessaan myös teknistaloudellisen arvioin, jonka perusteella metaanin varastointi kyseisellä menetelmällä oli sekä operointi että investointikustannuksiltaan CNG varastointia hiukan edullisempää [46].

4.5 Varastointi ajoneuvoissa

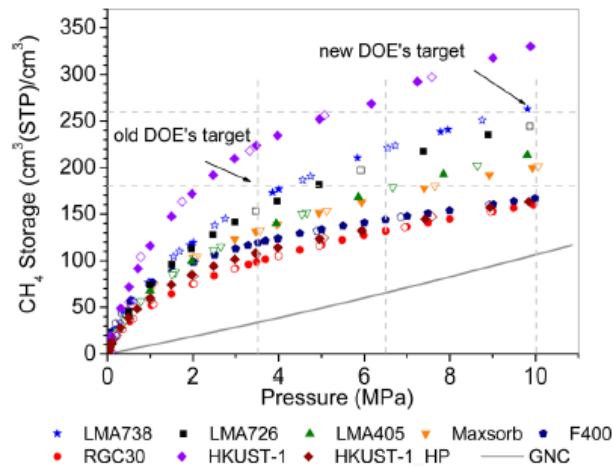
U.S Department of Energy (DOE) on menneiden vuosien aikana rahoittanut tutkimusohjelmia joissa on ollut tavoitteena sen hetkistä tilannetta selkeästi korkeampi metaanin varastointikyky ($V_{\text{CH}_4}/V_{\text{säiliö}}$). Aikaisempi DOE:n määrittämä tavoite oli 180 $\text{cm}^3_{\text{CH}_4}/\text{cm}^3_{\text{säiliö}}$ (STP). Vuonna 2012 DOE lanseerasi Presidentti Barrack Obaman toimesta uuden MOVE⁵ tutkimusohjelman metaanin käytön edistämiseksi ajoneuvoissa. Ohjelman ANG teknologioita koskevaksi metaanin varastointikykytavoitteeksi asetettiin 263 $\text{cm}^3_{\text{CH}_4}/\text{cm}^3_{\text{säiliö}}$ (STP) (noin 0,4g_{CH4}/g_{sorbent}), joka vastaa energiasisällöltään paineistetun metaanin varastointia 250 barin paineessa. Ohjelman tavoitteet on esitetty Taulukko 12:sta.

⁵ MOVE = Methane Opportunities for Vehicular Energy, <https://www.arpa-e.energy.gov/?q=arpa-e-programs/move>

Taulukko 12: U.S DOE MOVE ohjelman ANG teknologioita koskevat tavoitteet.

Kategoria:	Tavoitearvo:
Volumetrinen energiasäiltö	> 12.5 MJ/L (sorbent) > 9.2 MJ/L (tankin sisäpuoli huomioiden)
Gravimetrinen energiasäiltö	> 0.5 gCH ₄ /gsorbent (sorbent) > 0.4 gCH ₄ /g (tankin sisäpuoli huomioiden)
Sorbentin kustannus (uskottava polku tavoitteeseen)	< \$10/kg

Kuva 23:ssa on esitetty kahden lupaavimman aktiivisen hiili- sekä MOF rakenteen metaanin adsorbtiokyky paineen funktiona aina 100 bar asti. MOF rakenne HKUST-1 ylittää DOE:n tavoitteen selkeästi. Myös aktiivinen hiilirakenne LMA738 saavuttaa DOE:n tavoitteen 100 bar:n paineessa. MOF rakenteella HKUST-1 saavutetaan siis noin 50 bar paineessa sama energiasäiltö kuin CNG:llä 250 bar paineessa. Vastaavasti aktiivisella hiilirakenteella LMA738 sama energiasäiltö saavutetaan noin 100 bar paineessa.



Kuva 23: Metaanin varastointikapasiteetti eri aktivoituilla hiilillä ja kahdella MOF:lla [44].

DeSantis et. al. suorittivat vuonna 2017 tekno-ekonomisen tarkastelun (arvion) lupaavimmille MOF rakenteille. Tavoitteena tarkastelussa oli ymmärtää MOF materiaalin valmistuksen kustannustekijät suuren mittaluokan valmistuksessa (2.5 Milj. kg/a) sekä näyttää valmistuspolku, jolla DOE:n kustannustavoite alle \$10/kg sorbenttia olisi mahdollista saavuttaa. Tarkastelu tehtiin kahdelle eri valmistusprosessille, nesteavusteinen MOF rakenteen hienontaminen (LAG) ja vesipohjaiselle synteessille (Aqueous synthesis) ja kahdelle eri tuotantomäärälle, 50 000 kg_{MOF}/a ja 2.5 milj. kg_{MOF}/a. Tämä vastaa heidän arvionsa mukaan 1000 ja 50 000 auton metaanisäiliön materiaalitarvetta, eli 50 kg sorbenttia autoa kohden [41]. Tämä vastaisi enegiasäilytään noin 39 l bensiiniä⁶ ja tarkoittaisi noin \$500 valmistuskustannusta sorbentille per yhden ajoneuvon tankki.

Taulukko 13:sta on esitetty yhteenvedona kolmen MOF rakenteen kustannuspotentiaali optimoidun valmistusprosessin jälkeen. "Thermosolvent" sarake kuvaa lähtötilannetta. Mg₂(dobdc) materiaalilla olisi arvion perusteella mahdollista päästä LAG menetelmällä jopa alle DOE:n asettaman tavoitekustannuksen \$10/kg sorbenttia. Myös vesipohjaiseen synteisiin perustuvalla menetelmällä olisi arvion perusteella mahdollista päästä lähelle DOE:n tavoitetta. Kappaleessa 4.3 esitetyllä HKUST-1 materiaalilla jolla on erinomainen metaanin adsorbtiokyky

⁶ MOVE ohjelman tavoitteen mukaisesti 50 kg sorbenttia sitoisi 25 kg metaania (tehollinen lämpöarvo 50 MJ/kg) jonka energiasäiltö vastaa noin 39 l bensiiniä (tehollinen lämpöarvo 43,2 MJ/kg ja tiheys 745 kg/m³).

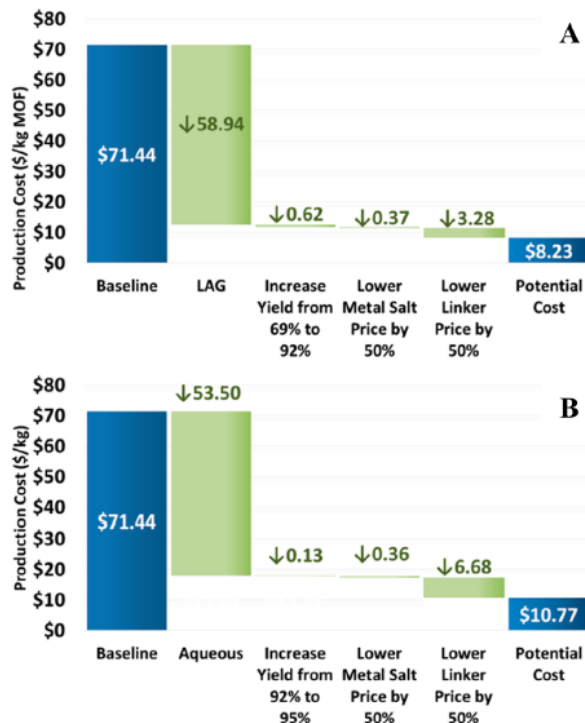
(Kuva 23) ei valmistusprosessia parantamalla olisi DeSantis et. al. analyysin perusteella mahdollista saavuttaa kustannustavoitetta LAG menetelmällä.

Taulukko 13: Vertailu lupaavimpien MOF rakenteiden kustannuspotentialista 50 000 järjestelmän (50 kg_{MOF}/auto) vuosituotannolla [41].

		thermosolvent	LAG	aqueous	potential cost	
					LAG	aqueous
total cost	Ni ₂ (dobdc)	\$58.69	\$20.55	\$19.41	\$12.11	\$12.58
	Mg ₂ (dobdc)	\$71.44	\$12.50	\$17.94	\$8.23	\$10.77
	MOF-5	\$34.76	\$13.85	not analyzed	\$8.34	not analyzed
material cost	HKUST-1	\$53.75	\$35.73	not analyzed	\$17.62	not analyzed
	Ni ₂ (dobdc)	\$38.28	\$17.24	\$13.66	\$9.05	\$6.83
	Mg ₂ (dobdc)	\$36.11	\$9.09	\$14.13	\$5.10	\$7.05
manufacturing cost	MOF-5	\$32.09	\$11.20	not analyzed	\$5.95	not analyzed
	HKUST-1	\$38.67	\$32.93	not analyzed	\$15.38	not analyzed
	Ni ₂ (dobdc)	\$20.41	\$3.31	\$5.75	\$3.06	\$5.75
	Mg ₂ (dobdc)	\$35.33	\$3.41	\$3.81	\$3.15	\$3.71
	MOF-5	\$2.67	\$2.65	not analyzed	\$2.39	not analyzed
	HKUST-1	\$15.08	\$2.80	not analyzed	\$2.24	not analyzed

Kuva 24:ssä on esitetty tarkemmin Mg₂(dobdc) MOF rakenteelle optimoitu valmistuspolku jolla tavoitekustannus olisi mahdollista saavuttaa tarkastelun kohteena olleella kahdella eri valmistusmenetelmällä. Kuvaajasta voidaan huomata, että suurin valmistuskustannuksen lasku saadaan suorittamalla rakenteen valmistus perinteisen lämpöliotussynteessin (solvothermal synthesis) sijasta esitetyillä kahdella vaihtoehdoisella menetelmällä, neste avusteinen hionta sekä vesipohjainen synteesi.

DeSantis et. al. eivät tuoneet esille julkaisussaan kustannusanalyysin pohjana käyttämänsä Mg₂(dobdc) MOF rakenteen metaanin adsorbtiokykyä.



Kuva 24: Mg₂(dobdc) MOF:n kustannuspotentialiaali LAG (A) ja aqueous (B) menetelmillä. [41]

4.6 Tulevaisuuden näkymä

Yleisesti tilanne näyttää siltä, että erilaisten adsorboitujen maakaasun säilöntämentelmien kehityksessä on tapahtunut merkittävää kehitystä viime vuosina. Pelkästään erilaisia MOF rakenteita esiintyy kirjallisuudessa yli 20 000 ja rakenteiden tutkimus ja kehittäminen jatkuu koko ajan [41].

Ajoneuvokäyttöä (niin maantie kuin työkoneet) ajatellen näyttää tällä hetkellä siltä, että aktiiviset hiilirakenteet tarjoavan vielä muita vaihtoehtoja, kuten MOF rakenteet, paremman toimivuuden käytännön olosuhteissa. Tällä hetkellä näyttää siltä, että kehityksen painopisteessä ovat aktiiviset hiilirakenteet sekä MOF rakenteet. Aktiiviset hiilirakenteet kestävät hyvin mekaanista kuormitusta (helpottaa säiliön paketoimista) sekä ovat kemiallisesti stabiileita, jolloin niiden rakenne ja metaanin adsorbti ominaisuudet eivät muutu yhtä helposti kuin MOF rakenteilla esim. kaasun pH-pitoisuuden vaihdellessa tai pienellä vesipitoisuuksilla. Tällä hetkellä kaupallisia ANG ratkaisuja tarjoavia yrityksiä on vielä melko vähän ja ne painottuvat aktiivisiin hiilirakenteisiin. Taulukko 14:sta on listattu muutamia ANG ratkaisuja sekä aktiivisia hiilirakenteita kehittäviä yrityksiä.

MOF rakenteita tutkitaan ja kehitetään kuitenkin koko ajan ja jo tällä hetkellä niiden erinomaisen hyvän metaanin adsorbtiokyky mahdollistaa alle 100 bar painetasolla ajoneuvokäytössä saman efektiivisen (käytettävissä oleva) metaanin energiamäärän kuin CNG 200 bar paineessa. MOF rakenteiden valmistuskustannuksia on myös todennäköisesti mahdollista laskea merkittävästi tämän hetkisestä kustannustasosta kuten DeSantis et. al. arvioivat. MOF rakenteiden käyttö metaanin varastointiin riippuu tällä hetkellä hyvin pitkälti siitä, onnistutaanko kehittämään uusia MOF rakenteita, joissa kemiallista stabiliteettia ja sietokykyä ulkoista painetta kohtaan on onnistuttu parantamaan kustannustehokkaassa rakenteessa.

Välivarastointisäiliöissä ANG ratkaisuilta ei tilan käytön suhteen vaadita yhtä suurta suorituskykyä kuin ajoneuvokäytössä, jolloin aktiivisten hiilirakenteiden sekä MOF rakenteiden lisäksi POP rakenteet voisivat olla lähitulevaisuudessa kilpailukykyinen vaihtoehto paineistetulle metaanille.

Taulukko 14: ANG teknologiaa tarjoavia yrityksiä.

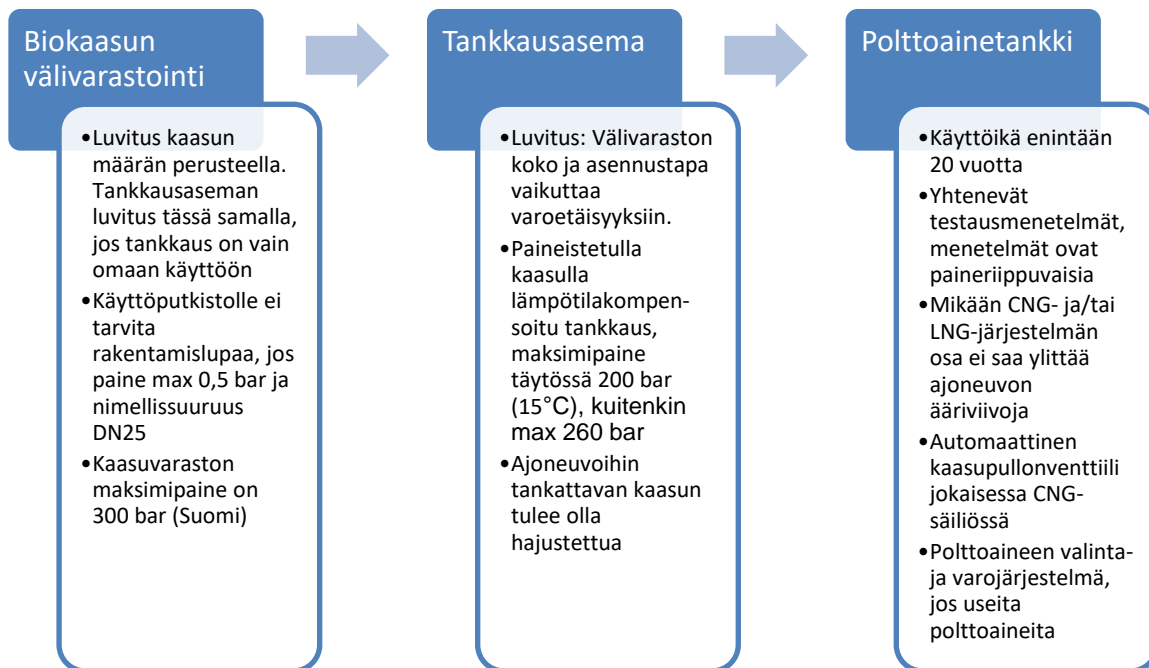
Toimija:	Kuvaus:	URL:
Adsorbed Natural Gas Products, Inc.	ANG säilöntäratkaisuja kaupallistava yritys.	https://www.angpinc.com/ang-technology
Cenergy Solutions	Valmistaa ANG tankkeja ajoneuvo- sekä varastointikäyttöön.	https://cenergysolutions.com/ang-storage/
enerG2	Valmistaa hiilimateriaaleja elektrokemian varastointijärjestelmiin. Huokoset hiilimateriaalit ANG ratkaisuihin kuuluvat tuoteportfolioon. BASF konsernin tytäryhtiö.	http://www.energ2.com/products.html#adsorbed
Ingevity	Aktivoitujen hiilimateriaalien valmistaja.	https://www.ingevity.com/markets/adsorbed-natural-gas/

5. Yhteenveto

BioMet2020 projektin julkisessa osassa tähdätään kehittämään biometaanin tuotantoa, varastointia ja käyttöä työkoneissa suorittamalla tutkimusta biokaasun puhdistuksen kustannusten laskemiseksi ja laadun nostamiseksi sekä tutkimalla biometaanin hyödyntämiseksi työkoneissa kipinäsytytteiselle palamiselle vaihtoehtoista dual-fuel diesel-metaanimoottoripalamiskonseptia. Lisäksi projektin aikana suoritettiin tämä käsillä oleva selvitys *Biometaanin välivarastointi ja varastointi ajoneuvossa - Tulevaisuuden mahdollisuudet*. BioMet2020 projektia rahoittivat Business Finland sekä mukana olleet suomalaiset yritykset AGCO Power Oy, Dinex Oy, Doranova Oy, Jepuan Biokaasu Oy, Valtra Oy ja Vilakone Oy.

Käsillä olevan raportin tarkoituksena on tuottaa tietoa suomalaisille yrityksille liittyen biometaanin varastointijärjestelmiin välivarastoinnissa ja ajoneuvoissa sekä niiden mahdollisiin kehityspolkuihin tulevaisuudessa. Selvityksessä käydään läpi biometaanin varastointiin liittyvä lainsäädäntö, nykyiset varastointiteknologiat sekä katsaus mahdollisiin tulevaisuuden varastointiteknologioihin.

Biokaasun tuotantoa ja kaasun käsittelyä koskee useat vaatimukset eri prosessivaiheissa. Käytännössä jokaisessa prosessin vaiheessa (mm. tuotetun biokaasun välivarastointi, puhdistus, siirtolinjat, tankkausasema, ajoneuvon polttoainetankki) tarvitaan turvallisuusviranomaisen hyväksyntä ja laitteistojen tekniset vaatimukset tulee täyttää. Kuva 25:ssä on esitetty tiivistettynä oleellimmat vaatimukset ja tarvittavat luvat, näkökulmana on pidetty biometaanin käyttöä ajoneuvopolttoaineena.



Kuva 25: Tiivistelmä oleellisimmista vaatimuksista ja luvista, kun biometaania käytetään ajoneuvopolttoaineena.

Biometaanin tai maakaasun varastointi vaatii suuremman tilavuuden samaa energiamäärää kohden kuin nestemäiset polttoaineet, kuten bensiini tai diesel. Esimerkiksi dieseliin verrattuna CBG/CNG (250bar) vaatii noin 4 ja LNG noin 1,6 kertaisen tilavuuden. Käytännössä paineistetun kaasun osalta tilan tarve on vieläkin suurempi johtuen lieriönmuotoisten säiliöiden

huonosta tilankäytöstä, jopa merkittävästi suurempi kuin 1:5 dieseliin nähden⁷. Tämä vaikuttaa suuresti kaasusäiliöiden sijoitteluun ajoneuvoissa, mutta myös välivarastoinnissa.

Biometaanin (sekä maakaasun ja biokaasun) säilytysratkaisut voidaan jakaa

- kaasuväestöön
 - matalapaineinen
 - korkeapaineinen
- nestemäiseen väestöön
 - nesteytetty metaani
- kiinteään väestöön
 - absorbointi väliaineeseen
 - adsorbointi väliaineeseen

Matalapaineinen kaasun väestöinti on usein korkeapaineista väestöintiä merkittävästi edullisempaa, mutta vaatii huomattavasti suuremman tilan. Lisäksi nykyinen kompressoriteknikka kuluttaa merkittävästi sähköenergiaa ja kaasulta vaaditaan merkittävästi korkeampaa puhtausastetta useissa käyttökohteissa. Näiden seikkojen vuoksi jalostamaton biokaasu säilytetään yleensä lähes aina matalapaineisessa väestössä.

Biokaasun väestöintiin matalapaineisena yleisesti käytettyjä väestöintitekniikoita ovat:

- Teräksestä valmistettu säiliö
- Kaasukello
 - Kiinteä tilavuus
 - Vaihteleva tilavuus
- Määtyslaitokseen integroitu kelluva kaasusäiliö
- Kalvoperusteinen säiliö
- Kaksoiskalvosäiliö

Paineistetut kaasusäiliöt edellyttävät hyvin puhdistettua kaasua korroosion välttämiseksi. Paineen kasvaessa puhtausvaatimukset tiukentuvat. Biokaasun kohdalla suurimmat korroosion aiheuttajat ovat rikkivety ja vesi, korkeissa paineissa jopa hyvin pieninä pitoisuuksina. Biokaasun paineistettu säilytys onkin harvinaista. Paineistetulle biometaanille ja maakaasulle käytetään samoja painesäiliöitä. Korkeapaineistetut kaasusäiliöt jaotellaan neljään luokkaan perustuen niiden valmistusmateriaaleihin (viidennen luokan painesäiliöitä on tutkittu, mutta niillä ei ole vielä virallisista hyväksyntää kaikilta viranomaisilta):

- Tyyppi I: Metall
- Tyyppi II: Metall & lasikuitu/hiilikuitu
- Tyyppi III: Metall (teräs/alumiini) & hiilikuitu
- Tyyppi IV: Polymeeri & lasi/hiilikuitu
- Tyyppi V: Täysin komposiittirakenne ei erillistä sisäverhousta

Samoja painesäiliöitä käytetään sekä kaasun välivarastointiin, että ajoneuvoväestöintiin. Korkeapainesäiliön massa ja hinta riippuvat säiliön tyypistä (materiaali- ja valmistuskustannus). Alla on esitetty Taulukko 15:ssä suuntaa antava hinta-arvio sekä massa eri tyyppien painesäiliöille.

⁷ Arvio perustuu Valtran käytännön kokemukseen metaanitankkien sijoittelusta ja tilantarpeesta traktorissa.

Taulukko 15: Massa- ja hinta-arvio tyyppin I - V painesäiliöille.

Säiliötyyppi:	Massa-arvio [kg/l]:	Hinta-arvio [€ ₂₀₁₇ /l]:
Tyyppi I:	0,8 - 0,72	3 - 5
Tyyppi II:	0,68 - 0,52	5 - 7
Tyyppi III:	0,5 - 0,41	9 - 13
Tyyppi IV:	0,33 - 0,24	11 - 17
Tyyppi V:	0,22 - 0,19	-

Säiliön kustannus riippuu merkittävästi tuotantomäärästä. Tyyppin IV painesäiliön valmistuskustannuksien on arvioitu laskevan merkittävästi seuraavien vuosien aikana valmistusmäärien kasvaessa johtuen CNG:n käytön lisääntymisestä ajoneuvojen polttoaineena. Lähteestä ja arvion pohjana olleesta valmistusmäärästä riippuen valmistuskustannusten arvioidaan laskevan jopa luokkaa 30 - 55 % nykytasosta.

Biometaanin tai maakaasun säilöntäratkaisu nestemäisessä muodossa voidaan jakaa kahteen päätyyppiin:

- paineistettuihin
 - o pallomaisiin säiliöihin (spherical tanks). Nämä ovat kuitenkin harvinaisia ratkaisua.
 - o sylinterimäinen säiliö puolipallon muotoisilla päillä (bullet tanks)
- ilmanpaineisiin
 - o tasapohjainen säiliö
 - o sylinterimäinen säiliö puolipallon muotoisilla päillä

Muodon lisäksi nestemäisen biometaanin tai maakaasun säiliöt voidaan jakaa niiden rakenteen perusteella kolmeen luokkaan: 1. yksinkertainen suojaus (vain yksi seinämä). 2. kaksinkertainen suojaus (sisempi vaippa kryogeenisiä lämpötiloja kestävästä teräksestä ja ulompi ei-kryogeenisiä lämpötila kestävästä terästä). 3. molemmat vaipat kryogeenisiä lämpötiloja kestävästä teräksestä.

Nesteytetyn metaanin paine nesteytysprosessin ulostulossa on tyypillisesti 3,5 bar, mikä on usein myös nestemäisen metaanin matalapainesäiliön paine. Metaani on nestemäistä normaalissa ilmanpaineessa alle -164 °C lämpötilassa, ja 3,5 bar paineessa nestemäisen metaanin lämpötilan tulee olla vähintään noin -150 °C. LNG/LBG säiliöstä haihtuu luonnollisen säiliön lämpötilan nousun seurauksena kaasua (boil-off gas) jonka metaanipitoisuus on hyvin suuri, lähes 100 %. Nestemäisestä metaanista kaasumaiseksi metaaniksi haihtuva osuus on tyypillisesti 0,1-0,5 % päivässä, joka tulee asianmukaisesti käsitellä ettei sitä pääse kulkeutumaan ilmaan sillä metaani on voimakas kasvihuonekaasu. LNG/LBG:n käyttökohteen (ajoneuvo, laiva yms.) vaatimukset tulee huomioida säiliön boil-off kaasunkäsittelyjärjestelmän suunnittelussa, jotta varmistetaan käyttökohteen saavan suunnitellun mukaista kaasua (metaaniluku). LNG/LBG säiliöiden hinta vaihtelee eri lähteiden perusteella välillä 720 - 3200 €₂₀₁₇/m³ riippuen säilön koosta. Säiliön hinta tilavuutta kohden laskee säiliön tilavuuden noustessa. LNG/LBG säiliöiden kustannusten on arvioitu laskevan noin 20 - 25 % Euroopassa ja Pohjois-Amerikassa vuoteen 2025 mennessä vuoden 2015 tasosta johtuen pääosin LNG käytön lisääntymisestä raskaan tieliikenteen polttoaineena.

Yhdysvaltojen edellisen Presidentin Barrack Obaman käynnistämän MOVE (Methane Opportunities for Vehicular Energy) ohjelman puitteissa on syntynyt uusia ratkaisuita metaanin varastointiin korkeapaineisena sekä kiinteän aineen pintaan varastoituneena.

Ohjelman ansiosta markkinoille on tullut perinteisten lieriön muotoisten korkeapainesäiliöiden lisäksi myös suorakaiteen muotoisia ja useasta pienemmästä toisiinsa peräkkäin kytketyistä tyyppin IV lieriöstä koostuvia säiliöitä joilla saavutetaan 20 - 35 % suurempi energiatiheys säiliön varaamaa tilavuusyksikköä kohden (MJ/m^3) kuin perinteisellä tyyppin IV painesäiliöllä. Uusia säiliöratkaisuja tarjoavat esim. Yhdysvaltalaiset yritykset Westport, REL ja UTRC.

Vaikka biometaanin varastointi kiinteään aineeseen on ollut tähän asti vielä vähäistä, on tutkimus ja käyttäjien kiinnostus (etenkin Yhdysvalloissa) ANG ratkaisuja kohtaan kasvanut merkittävästi U.S. DOE:n lanseeraaman MOVE ohjelman myötä. Ohjelman tavoitteena oli tukea ANG teknologioiden tutkimusta seuraavien tavoitteiden saavuttamiseksi:

- Volumetrinen energiasisältö: 9,2 MJ/L (tankin sisäpuoli huomioiden)
- Gravimetrinen energia sisältö: > 0,5 gCH₄/gsorbent (sorbent)
- Sorbentin kustannus (uskottava teknologinen polku): < \$10/kg

Volumetrinen energiasisältö 9,2 MJ/L vastaa normaalin CNG:n energiasisältöä 250 bar paineessa.

Keskeisimmät ANG materiaalit ovat huokoinen orgaaninen polymeerirakenne (POP), aktiivinen hiilirakenne, metalliorganiset rungot sekä metaanihydraatit. Näistä lupaavimpia ANG teknologioita ajoneuvoissa ovat aktiiviset hiilirakenteet, POP ja MOF rakenteet. Näillä rakenteilla on mahdollista saavuttaa CNG:n energiatiheys (MJ/m^3) huomattavasti CNG:tä matalammalla painetasolla luokkaa 100 bar ja alle, jolloin kaasun tankkausosiemien investointi ja käyttökustannukset laskevat. Alle 100 bar painetaso mahdollistaa myös tankkauksen kotona ns. kotitankkausjärjestelmillä niillä alueilla jotka ovat kytkettynä maakaasuverkkoon.

POP rakenteiden etuna ovat: mahdollisuus muodostaa rakenne kevyistä materiaaleista, suuri joukko tunnettuja synteettisiä valmistuspolkuja, polymeerit ovat kemiallisesti ja termisesti stabiileja sekä polymeerit voidaan syntetisoida suoraan "monoliittiseen" muotoon. Nykyisillä POP materiaaleilla on mahdollista saavuttaa hyvä gravimetrinen metaanin adsorbtiokyky kuten PPN-4 materiaalilla 0,389 g_{CH₄}/g_{sorbent}, joka on hyvin lähellä MOVE ohjelman tavoitetta. Nykyisillä POP materiaaleilla matalan tiheyden johdosta kuitenkin volumetrinen metaanin sidontakyky jää heikoksi, jolloin ajoneuvokäytössä nykyiset materiaalit eivät vielä tarjoa riittävää metaanin varastointikykyä. POP rakenteet voisivat kuitenkin olla varteenotettava vaihtoehto välivarastoinnissa.

Aktiiviset hiilirakenteet mahdollistavat jo tällä hetkellä DOE:n metaanin adsorbtiotavoitteen saavuttamisen, kuten materiaali LMA738 100 bar paineella noin 270 cm³_{CH₄}/cm³_{säiliö}. Aktiiviset hiilirakenteet ovat suhteellisen helposti valmistettavissa joko synteettisesti hapon avulla kemiallisen aktivoinnin kautta tai hapon avulla perustuen luonnon materiaaleihin kuten puu, antrasiitti, polymeerit tai maatalouden jäännöstuotteet. Aktiivisten hiilirakenteiden valmistus on myös suhteellisen edullista verrattuna muiden ANG ratkaisuiden valmistukseen. Lisäksi aktiivisten hiilirakenteiden hyvänä puolena on niiden hyvä sietokyky mekaanista kuormitusta vastaan sekä niiden kemiallinen stabiilius. Aktiivihielten huonona puolena on materiaalin rajoitetut muokkausominaisuudet, jonka takia metaanin adsorbti ominaisuuksia on haastava nostaa nykyisestä tasosta merkittävästi korkeammalle tasolle. Aktiiviset hiilirakenteet ovat kuitenkin tällä hetkellä eniten hyödynnetty materiaali ANG ratkaisuihin, mm. seuraavat Yhdysvaltalaiset yritykset tarjoavat joko aktiivihieleen perustuvia säilöntäratkaisuja tai materiaaleja niihin: Adsorbed Natural Gas Products, Inc., Cenergy Solutions, enerG2 ja Ingevity.

MOF rakenteet muodostavat tällä hetkellä yhden mielenkiintoisimmista tulevaisuuden materiaalia vaihtoehtoista ANG säiliöihin johtuen niiden hyvistä ominaisuuksista kuten suuri materiaalin pinta-ala, muokkailtavissa oleva pintarakenne huokoisine koloineen sekä monipuoliset kemialliset ominaisuudet. MOF materiaaleja on mahdollista muokata myös siten, että ANG materiaaleille tyypillinen suuri metaanin sitoutuminen matalalla painetasolla

vältetään, jolloin sorbenttiin sitoutunut käyttökelpoinen metaanin määrä kasvaa. Parhaimmilla MOF rakenteilla (esim. HKUST-1) saavutetaan jo noin 50 bar metaanin säilöntäpaineella DOE:n tavoite $263 \text{ cm}^3_{\text{CH}_4}/\text{cm}^3_{\text{säiliö}}$ ja 100 bar säilöntäpaineella jo noin $330 \text{ cm}^3_{\text{CH}_4}/\text{cm}^3_{\text{säiliö}}$ adsorbtiomäärä, joka vastaa noin 25 % suurempaa energiamäärää kuin tavallinen CNG 250 bar paineessa. Toistaiseksi kuitenkin MOF rakenteiden heikko sietokyky ulkopuolista mekaanista painetta kohtaan, kemiallinen epästabiilius sekä herkkyys kaasussa olevia epäpuhtauksia ja vesihöyryä kohtaan estävät niiden käytön vielä käytännön sovelluksissa. MOF rakenteiden valmistuskustannukset ovat myös vielä selvästi korkeammat kuin esim. aktiivisten hiilirakenteiden. MOVE ohjelman puitteissa on tosin esitetty MOF rakenteiden valmistusprosessin kehittämispolkuja, joilla valmistuskustannukset voisi laskea tavoitetasolle ($<10\$/\text{kg}_{\text{sorbent}}$).

Tässä raportissa on esitetty oleelliset vaatimukset ja tarvittavat luvat varastoitaessa biometaania ajoneuvokäyttöön. Lisäksi on käsitelty erilaisten varastointivaihtoehtojen tekniikkaa, kustannuksia ja tulevaisuuden näkymiä. Biokaasu varastoidaan ennen käyttöä tai jalostamista biometaaniksi pääosin matalapaineisena, sillä biokaasun kompressointi ei ole taloudellisesti kannattavaa. Biometaani varastoidaan lähes täysin paineistettuna 200 - 250 bar paineessa korkeapainesäiliöissä. Paineistaminen suoritetaan kompressoreilla joka on prosessina melko kallis. Biometaania nesteytetään myös jonkin verran, mutta nykyisillä biokaasun puhdistusmenetelmillä on vaikea saavuttaa kustannustehokkaasti nesteykselle vaadittavaa biometaanin puhtausastetta. Korkeapainesäiliön massa ja hinta riippuvat säiliön tyypistä (tyyppi I, 3 €/l - Tyyppi IV, 17 €/l), mutta valmistumäärien kasvaessa kustannukset tulevat laskemaan. Nesteytetyn metaanin (LNG/LBG) säiliöiden hinta kokoluokan 500 - 5000 m³ säiliöille vaihtelee välillä 0,72 - 3,2 €/l riippuen säilön koosta. LNG/LBG säiliöiden kustannusten odotetaan myös laskevan lähitulevaisuudessa käytön lisääntyessä. Meriliikenteessä käytetään tulevaisuudessa myös LNG:ltä polttoaineena joka mahdollistaa synergiaetuja maalikenteen LNG varastoinnille ja ajoneuvokäytölle. ANG teknologioiden osalta näyttää yleisesti siltä, että ne voisivat hyvinkin lähitulevaisuudessa teknisten ominaisuuksiensa puolesta tarjota varteenotettavan vaihtoehdon paineistetun maakaasun (CNG) ohella ajoneuvokäytössä metaanin varastoimiseksi. Se miten ANG ratkaisut kehittyvät tulevaisuudessa niin teknisten ominaisuuksiensa, mutta erityisesti kustannusten osalta riippuu hyvin paljon siitä kuinka paljon biometaanin ja maakaasun käyttö ajoneuvoissa lisääntyy. Välivarastoinnissa ANG ratkaisut voisivat tarjota kevyen ja kustannustehokkaan varastointimuodon jo nyt, koska jo noin 100 bar painetasolla saavutetaan sama energiatiheys (MJ/M³) kuin CNG:llä.

Lähdeviitteet

- [1] Tukes, "Turvallisuus- ja kemikaalivirasto (Tukes)," 08 24 2015. [Online]. Available: <https://tukes.fi/documents/5470659/6373024/Tukes-ohje+-+Maakaasun+k%C3%A4sittelyn+turvallisuus/ca791766-bf7e-4cf8-8460-555911debbdc/Tukes-ohje+-+Maakaasun+k%C3%A4sittelyn+turvallisuus.pdf>. [Haettu 18 12 2018].
- [2] Suomen Kaasuyhdistys ry, "Turvallisuus- ja kemikaalivirasto (Tukes)," 2011. [Online]. Available: http://www.kaasuyhdistys.fi/sites/default/files/pdf/oppaat/Maakaasu_tankkausasemaohje.pdf. [Haettu 18 12 2018].
- [3] Yhdistyneiden kansakuntien Euroopan talouskomissio UN/ECE, "EUR-Lex," 30 6 2015. [Online]. Available: [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:42015X0630\(01\)&from=FI](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:42015X0630(01)&from=FI). [Haettu 18 12 2018].
- [4] H. Berg, "Natural gas takes the role as a back-up fuel," Wärtsilä, 22 May 2018. [Online]. Available: <https://www.wartsila.com/twentyfour7/in-detail/natural-gas-takes-the-role-as-backup-fuel>. [Haettu 7 September 2018].
- [5] Suomen Kaasuyhdistys, "LNG asiakassäiliöt," Suomen Kaasuyhdistys, [Online]. Available: http://www.kaasuyhdistys.fi/sites/default/files/html/lng_asiakassailiot_lowres_2017/index.html. [Haettu 26 September 2018].
- [6] Chemical Engineering, "Economic indicators," *Chemical Engineering*, nro November, p. 72, 2018.
- [7] European Central Bank, "US dollar," [Online]. Available: https://www.ecb.europa.eu/stats/policy_and_exchange_rates/euro_reference_exchange_rates/html/eurofxref-graph-usd.en.html. [Haettu 5 February 2018].
- [8] European Biogas Association, "Denmark: Countries largest biogas plant under construction," European Biogas Association, 28 November 2016. [Online]. Available: <http://european-biogas.eu/2016/11/28/denmark-countries-largest-biogas-plant-under-construction/>. [Haettu 26 September 2018].
- [9] K. Krich, D. Augenstein, B. JP, J. Beneman, B. Rutledge ja D. Salour, "Biomethane from Dairy Waste. A Sourcebook for the Production and Use of Renewable Natural Gas in California," 2005. [Online]. Available: <https://suscon.org/publications/>. [Haettu 18 October 2018].
- [1] Wikipedia, "Gas holder," Wikipedia, 4 October 2018. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Gas_holder. [Haettu 18 October 2018].
- [1] Wikipedia, "Kaasukello," Wikipedia, 16 January 2018. [Online]. Available: <https://fi.wikipedia.org/wiki/Kaasukello>. [Haettu 18 October 2018].
- [1] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), "Guide to biogas. From production 2] to use.," 2010. [Online]. Available: https://mediathek.fnr.de/media/downloadable/files/samples/g/u/guide_biogas_engl_2012.pdf. [Haettu 12 October 2018].
- [1] The Utile Engineering Co. Ltd., "Biogas storage tanks," The Utile Engineering Co. Ltd., 3] [Online]. Available: <http://www.utileengineering.co.uk/biogas-storage-tanks/>. [Haettu 18 October 2018].
- [1] K. Fletcher, "Biogas buffer," 23 July 2015. [Online]. Available: <http://biomassmagazine.com/articles/12177/biogas-buffer>. [Haettu 19 October 2018].
- [1] Alibaba, "High strength polyester fabric Bio Gas storage tank," Alibaba, [Online]. 5] Available: https://amoco.en.alibaba.com/product/575736880-212297247/High_strength_polyester_fabric_Bio_Gas_storage_tank.html?spm=a2700.icbuShop.84.10.78847cdaCNyrFA. [Haettu 19 October 2018].

- [1 TUKES, "Maakaasun varastointi," TUKES, [Online]. Available:
6] <https://tukes.fi/teollisuus/maakaasu-ja-biokaasu/maakaasun-varastointi>. [Haettu 22 October 2018].
- [1 Owens Corning Company, "Innovation in Composite CNG Cylinders," 2009. [Online].
7] Available:
http://www.ocvreinforcements.com/pdf/library/Owens_Corning_Innovation_Composite_CNG_Cylinders_JECAAsia2009_091009.pdf. [Haettu 22 October 2018].
- [1 B. D. James, C. Houchins, J. M. Huya-Kouadio ja D. A. DeSantis, "Final Report:
8] Hydrogen Storage System Cost Analysis," September 2016. [Online]. Available:
<https://www.osti.gov/servlets/purl/1343975>. [Haettu 19 October 2018].
- [1 WE R CNG, [Online]. Available: <http://wercng.com/>. [Haettu 2 November 2018].
9]
- [2 Frost & Sullivan, "Global Medium-Heavy Duty CNG and LNG Truck Market Disruptive
0] Impact of Global LNG Trade and Rising Engine Platformization Drive NG Truck Proliferation," Frost & Sullivan, 2016.
- [2 Worthington, "Multiple Element Gas Container," [Online]. Available:
1] <https://worthingtonindustries.com/Products/Alternative-Fuels/Multiple-Element-Gas-Container#>.
- [2 International Gas Union (IGU), "Small Scale LNG," 2015. [Online]. Available:
2] http://www.igu.org/sites/default/files/node-page-field_file/SmallScaleLNG.pdf. [Haettu 22 October 2018].
- [2 P. Haimila, LIKENNEBIOKAASUN JAKELU MIKKELIN SEUDULLA. Diplomityö,
3] Lappeenranta: Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto, Tuotantotalouden koulutusohjelma, 2015.
- [2 FuelMaker, "The Products. CNG refuelling," [Online]. Available: <http://www.fuel-maker.com/en/default.aspx>. [Haettu 22 October 2018].
4]
- [2 Air & Gas Technologies, "FMQ-2-36 Fuelmaker CNG Refueling Appliance," [Online].
5] Available: <https://www.airgastech.com/fmq-2-36-fuelmaker-cng-refueling-appliance.html>. [Haettu 22 October 2018].
- [2 R. Hinterberger, "Biogas als Treibstoff: Wirtschaftliche Grundlagen und Machbarkeit,"
6] 2011. [Online]. Available:
https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/edz_pdf/1112_biogas_als_treibstoff.pdf. [Haettu 22 October 2018].
- [2 C. Red, "CompositesWorld," 12 Tammikuu 2014. [Online]. Available:
7] <https://www.compositesworld.com/articles/pressure-vessels-for-alternative-fuels-2014-2023>. [Haettu 24 Lokakuu 2018].
- [2 D. N. Sirosh, Quantum Technologies Inc., 26 Tammikuu 2012. [Online]. Available:
8] <https://www.arpa-e.energy.gov/sites/default/files/documents/files/Neel%20Sirosh%2C%20Quantum%2C%20FINAL.pdf>. [Haettu 24 Lokakuu 2018].
- [2 P. E. Livio Gambone, "ARPA-E," 18 Marraskuu 2013. [Online]. Available:
9] https://www.arpa-e.energy.gov/sites/default/files/documents/files/6_SessionA_Gambone_0.pdf. [Haettu 24 Lokakuu 2018].
- [3 "NGV Global News," 9 Joulukuu 2011. [Online]. Available:
0] <https://www.ngvglobal.com/blog/new-cng-zafira-tourer-with-530-km-natural-gas-range-1209>. [Haettu 25 10 2018].
- [3 "Gas Trucks UK," 25 Lokakuu 2018. [Online]. Available:
1] <http://www.gastrucks.co.uk/index.php/stralis-np>. [Haettu 25 Lokakuu 2018].
- [3 "OEM Off-Highway," 29 Elokuu 2017. [Online]. Available:
2] <https://www.oemoffhighway.com/trends/equipment-launches/agriculture/press->

- release/20974057/new-holland-agriculture-new-holland-presents-methane-power-concept-tractor-at-farm-progress-show-2017. [Haettu 25 Lokakuu 2018].
- [3] "Westport," Westport, 25 10 2018. [Online]. Available: <https://www.westport.com/is/core-3-technologies/fit-pack>. [Haettu 25 Lokakuu 2018].
- [3] "REL," REL Inc., 25 Lokakuu 2018. [Online]. Available: <https://www.relinc.net/advanced-4-materials/conformable-natural-gas-tank/>. [Haettu 25 Lokakuu 2018].
- [3] "ARPA-e," UTRC, 1 Maaliskuu 2017. [Online]. Available: <https://www.arpa-e.energy.gov/?q=slick-sheet-project/modular-natural-gas-tank>. [Haettu 25 Lokakuu 2018].
- [3] H.-M. W. W. Z. J. Q. X. a. B. C. Bin Li, "Porous Metal-Organic Frameworks: Promising
6] Materials for Methane Storage," *Chem*, osa/vuosik. October 13, nro 1, pp. 557-580, 2016.
- [3] R. C. & D. S.-K. T. S. Alhasan, "A review of adsorbed natural," *International Journal of
7] Environmental Studies*, osa/vuosik. 73, nro 3, pp. 343-356, 2016.
- [3] J.-R. L. W. L. a. H.-C. Z. Trevor A. Makal, "Methane storage in advanced porous
8] materials," *Chemical society reviews*, osa/vuosik. Chem Soc Rev, nro 2012, pp. 7761-7779, 2012.
- [3] J. O. M. K. T. M. R. H. J. R. J. E. B. I. G. A. C. A. G. C. M. B. P. L. L. N. M. & J. R. L.
9] Jarad A. Mason, "Methane storage in flexible metal-organic frameworks with intrinsic thermal management," *Nature*, osa/vuosik. 527, pp. 357-361, 2015.
- [4] B. T. A. T. F. S. M. J. R. D. B. Y. S. L. Z. a. A. I. C. Colin D. Wood, "Microporous Organic
0] Polymers for Methane Storage," *Advanced Materials*, osa/vuosik. 2008, nro 20, pp. 1916-1921, 2008.
- [4] J. A. M. B. D. J. C. H. J. R. L. a. M. V. Daniel DeSantis, "Techno-economic Analysis of
1] Metal-Organic Frameworks for Hydrogen and Natural Gas Storage," *energy&fuels*, osa/vuosik. Energy Fuels 2017, nro 31, pp. 2024-2032, 2017.
- [4] S. B. E. A. J. G. S. D. M. B. J. L. Q. W. H. D. O. K. O. J. M. O. Y. W. T.-B. L. a. H.-C. Z.
2] Yu Fang, "Incorporating Heavy Alkanes in Metal-Organic Frameworks for Optimizing Adsorbed Natural Gas Capacity," *Chemistry A European Journal*, osa/vuosik. Chem. Eur. J. 2018, nro 24, pp. 16977-16982, 2018.
- [4] A. C. N. R. B. J. A. Michael Feroldi, "Adsorption technology for the storage of natural
3] gas," *International Journal of Energy Research*, osa/vuosik. 40, p. 1890-1900, 2016.
- [4] M. M.-E. E. G.-R. K. K. J. S.-A. a. F. R.-R. Mirian Elizabeth Casco, "High-Pressure
4] Methane Storage in Porous Materials: Are Carbon Materials in the Pole Position?," *Chemistry of Materials*, osa/vuosik. Chem. Mater. 2015, nro 27, pp. 959-964, 2015.
- [4] S. F. Y. W. Xuemei Lang, "Intensification of methane and hydrogen storage in clathrate
5] hydrate and future prospect," *Journal of Natural Gas Chemistry*, osa/vuosik. 19, p. 203-209, 2010.
- [4] A. J. H. W. P. B. R. K. K. P. R. P. L. Hari Prakash Veluswamy, "Rapid methane hydrate
6] formation to develop a cost effective large scale energy storage system," *Chemical Engineering Journal*, osa/vuosik. 290, p. 161-173, 2016.

Liite 1: Yrityksille esitetyt kysymykset ja niiden vastaukset

Doranova Oy

1. Voitteko kertoa yrityksenne liiketoiminnasta muutamalla lauseella?
<p>Doranova Oy on biokaasuratkaisujen, sekä maaperän ja pohjaveden kunnostuksen edelläkävijä. Maaperien kunnostuksia Doranova on suorittanut jo yli 20 vuoden ajan itse kehittämillään in situ menetelmillä, jotka eivät vaadi massojen vaihtoa, eivätkä häiritse kunnostettavan kohteen muuta käyttöä. Biokaasuliiketoiminta taas on keskittynyt kaatopaikka- ja biokaasulaitosten projektitoimituksiin, joita tehdään Suomen ja Baltian lisäksi Aasiassa ja Afrikassa. Lisäksi yhtiöllä on molemmilla toimialoilla vahvaa T&K toimintaa.</p> <p>Doranova Oy on perustettu vuonna 1995 ja yhtiö työllistää suoraan tällä hetkellä 19 ympäristöalan osaaajaa. Vuonna 2017 Doranovan liikevaihto oli 5,3 miljoona Euroa.</p>
2. Miten biokaasu ja biometaani liittyvät yrityksenne toimintaan?
<p>Biokaasuratkaisut (kaatopaikat ja biokaasulaitokset) käsittävät noin 75% Doranovan liiketoiminnasta. Doranovan strategisena tavoitteena onkin kehittää biokaasuratkaisuja, kuten Hardferm-kuivamädätysreaktoreita, niin että yhtiö pystyy vastaamaan alan haasteisiin myös tulevaisuudessa. Näitä haasteita ovat esimerkiksi kaasun liikennekäytön lisääntyminen ja aiempaa hankalampien syötteiden käsittelyn kasvu.</p>
3. Mitä biokaasun tai biometaanin välivarastointiin ja/tai varastointiin ajoneuvossa liittyviä ratkaisuja on teillä käytössä tai on teidän tiedossa?
<p>Asiakkaamme Jepuan biokaasu käyttää pullokonttiratkaisuja kaasun siirtoon ja varastointiin. Lisäksi biometaanin varastointi "gas holderissa" on mahdollista vaikkei kovinkaan tavallista (sopii paremmin biokaasulle). Lisäksi nesteytetyn kaasun logistiikkaratkaisut ovat mahdollisia biokaasun tuotannon ollessa tarpeeksi suurta.</p>
4. Mitä haasteita ja kehitystarpeita teidän näkemykseen ja kokemukseen perustuen liittyy yllä mainittuihin ratkaisuihin?
<p>CBG:n varastointiratkaisujen hinta on suurin yksittäinen syy niiden yleistymisen hitaudelle. Nesteytetyn kaasun osalta taas haasteita löytyy teknisten ratkaisujen hinnan lisäksi kaasun höyrystymisen aiheuttamista haasteista.</p>
5. Mitä teknisiä, laadullisia ja kustannuksiin liittyviä vaatimuksia teidän mielestänne biometaanin varastoinnille on?
<p>Turvallisuus ja säilytys-/kuljetusratkaisun omapaino ovat hinnan lisäksi tärkeimmät muuttujat.</p>
6. Mitä kehitystarpeita näette tulevaisuudessa liittyvän biometaanin varastointiin, jotta biometaanin käyttö polttoaineena voisi lisääntyä?
<p>Kustannuskäyrällä on päästävä alaspäin riippumatta sovelluksen mittakaavassa. Teollisen mittakaavan lisäksi yksittäisten käyttäjien, kuten maatilojen ratkaisuvaihtoihin on saatava enemmän laajuutta.</p>

Jepuan Biokaasu Oy

1.	Voitteko kertoa yrityksenne liiketoiminnasta muutamalla lauseella?
	Olemme biokaasun tuottaja. Jalostamme biokaasun liikennekäyttöön soveltuvaksi. Tuotantolaitoksen yhteydessä on CBG:n tankkausasema. Toimitamme teollisuuteen biometaania pullokonteissa ja raakaa biokaasua siirtolinjaa pitkin. Vuonna 2019 avoamme 1-2 uutta tankkausasemaa, joihin kaasu siirretään pullokonteissa.
2.	Miten biokaasu ja biometaani liittyvät yrityksenne toimintaan?
	Tuotamme mädätysprosessissa biokaasua, josta jalostamme biometaania vesipesurilla.
3.	Mitä biokaasun tai biometaanin välivarastointiin ja/tai varastointiin ajoneuvossa liittyviä ratkaisuja on teillä käytössä tai on teidän tiedossa?
	Tavanomaiset henkilöautojen pullojärjestelmät biometaanille, niin auton tavaratilassa kuin sen ulkopuolella alla suojakotelossa. Välivarastoinnissa käytössä ovat 250 bar:n pullokontit.
4.	Mitä haasteita ja kehitystarpeita teidän näkemykseen ja kokemukseen perustuen liittyy yllä mainittuihin ratkaisuihin?
	Tavanomaisen paineen 250 bar noston esim. 300 bariin, tai edelleen 350 bariin. Metaanin riittävä laatu nesteytykseen on haastavaa saavuttaa. Tähän tarvittaisiin kustannustehokasta kaasun rikastusteknologiaa, joka vastaisi metaanin laatuksiteerejä. Myös nesteytyslaitteisto investointina on saatava kohtuulliselle tasolle pienelle toimijalle.
5.	Mitä teknisiä, laadullisia ja kustannuksiin liittyviä vaatimuksia teidän mielestänne biometaanin varastoinnille on?
	CBG:lle vaatimukset ovat kohtuullisen helppoja saavuttaa käsillä olevilla tekniikoilla. LBG:n osalta biometaanin puhdistusprosessi on suurempi haaste kuin nesteyttäminen.
6.	Mitä kehitystarpeita näette tulevaisuudessa liittyvän biometaanin varastointiin, jotta biometaanin käyttö polttoaineena voisi lisääntyä?
	Jakeluverkostoa tulee kehittää. Lisäksi katso kohta 4.

Valtra Oy

1.	Voitteko kertoa yrityksenne liiketoiminnasta muutamalla lauseella?
	Valtra kehittää, valmistaa, markkinoi, myy ja huoltaa maataloustraktoreita.
2.	Miten biokaasu ja biometaani liittyvät yrityksenne toimintaan?
	Maakaasu ja biometaani ovat yksi mielenkiintoinen vaihtoehto tulevaisuudessa traktorin polttoaineeksi. Valtaosa Valtran asiakkaista toimivat maatalouden alalla jossa biokaasun ja biometaanin tuottaminen on tällä hetkellä suuren mielenkiinnon alla ja siten Valtralla on halu seurata kehitystä myös laajemmin ja pohtia uusia liiketoimintamahdollisuuksia kaasua käyttävien traktoreiden lisäksi kyseisessä toimintaympäristössä.
3.	Mitä biokaasun tai biometaanin välivarastointiin ja/tai varastointiin ajoneuvossa liittyviä ratkaisuja on teillä käytössä tai on teidän tiedossa?
	<p>Olemme rakentaneet prototyyppisiä traktoreista jotka hyödyntävät biometaania polttoaineena. Näissä kaasun varastointiin on käytetty komposiitti (tyypin 4) mukaisia CNG tankkeja. Henkilöautoissa käytetään yleisimmin tyypin 1 terässäiliöitä paineistetun kaasun varastointiin, jotka olisi toinen luonnollinen vaihtoehto myös traktorikäyttöön.</p> <p>Muita tiedossa olevia ratkaisuja ovat nesteytetty LNG varastointi jota on käytössä mm. raskaassa tieliikennekalustossa. Lisäksi olemme törmänneet lähinnä tulevaisuuden mahdollisuuksina ns. ANG ratkaisuun jossa kaasun on matalammassa paineessa absorboituneena säiliön väliaineeseen.</p> <p>Lisäksi on nähty erilaisia paineistetun kaasun ratkaisuja joissa pyritään parantamaan suurien sylinterimäisten säiliöiden väliin jäävää hukkatilaa erilaisilla ratkaisuilla.</p>
4.	Mitä haasteita ja kehitystarpeita teidän näkemykseen ja kokemukseen perustuen liittyy yllä mainittuihin ratkaisuihin?
	<p>Käyttökokemuksia on ainoastaan paineistetun kaasun ratkaisuista joissa ei toistaiseksi käytännössä ole havaittu suurempia ongelmia. Terässäiliöt olisivat edullisin vaihtoehto mutta niiden korroosion mahdollisuus on epäkohta, komposiittitankeissa ei ole korroosion vaaraa mutta tankit tulee suojata hyvin ulkopuolisilta kontakteilta jolle traktorin rakenteet voivat helposti kohdistua.</p> <p>Suurin haaste paineistetun kaasun varastoinnissa ajoneuvossa on sen vaatima tila suhteessa energiamäärään. Olemme havainneet käytännössä että paineistettu kaasun varaa tilaa ajoneuvosta n. 10-kertaisen määrän dieseliin verrattuna. 200barin paineessa kaasun ja dieselin energia-tilavuus suhde on n. 1:5, mutta lisäksi kun huomioidaan sylinterimäiset tankit, niiden väliin jäävä tila, sylinterien kiinnikkeiden ja suojarakenteiden sekä tankkien venttiilien ja putkitusten vaatima tila päädytään kokonaisuudessa tuohon mainittuun 10-kertaisen tilan vaatimukseen suhteessa dieseliin. Diesel tankki voidaan suunnitella hyvin monimuotoiseksi hyödyntäen kaikki olemassa oleva tila kun taas kaasutankin muoto on hyvin vakioitu.</p>
5.	Mitä teknisiä, laadullisia ja kustannuksiin liittyviä vaatimuksia teidän mielestänne biometaanin varastoinnille on?
	Ajoneuvossa varastointiratkaisun pitää olla robusti ja vaihtelevia ympäristöolosuhteita kestävä. Myös huollon ja logistiikan turvallisuusnäkökulmat tulee ottaa huomioon. Ylipäätään uusissa ratkaisuissa turvallisuuden huomioiminen on tärkeää kun puhutaan palavasta kaasumaisesta, näkymättömästä polttoaineesta.
6.	Mitä kehitystarpeita näette tulevaisuudessa liittyvän biometaanin varastointiin, jotta biometaanin käyttö polttoaineena voisi lisääntyä?

Ajoneuvovarastointiin olisi hyvä löytyä ratkaisu joka mahdollistaa korkeamman energia-tilavuus suhteen. On myös hyvin mahdollista jos biometaanin käyttö lisääntyy maataloudessa, että tarvitaan uusia edullisia kaasuntankkiratkaisuja joilla kaasua voidaan siirtää järkevästi tuotantopaikalta työkohteisiin ja kompensoida ajoneuvoon varastoitua kaikissa tehtävissä mahdollisesti riittämätöntä energiamäärää.