



Fredrik Helenelund

Biometaanin laadun ja mittaustarkkuuden parantamisesta syntyvä taloudellinen hyöty

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Energia- ja ympäristötekniikka

Insinöörityö

6.9.2022

Tiivistelmä

Tekijä:	Fredrik Helenelund
Otsikko:	Biometaanin laadun ja mittaustarkkuuden parantamisesta syntyvä taloudellinen hyöty
Sivumäärä:	36 sivua + 4 liitettä
Aika:	6.9.2022
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Energia- ja ympäristötekniikka
Ammatillinen pääaine:	Energiatuotantomenetelmät
Ohjaajat:	Lehtori Juha Juselius Tuotepäällikkö Antti Heikkilä

Opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää biometaanin laadun ja mittaustarkkuuden parantamisen taloudellista kannattavuutta. Työssä selvitettiin myös kahdeksan maan kaasuverkkojen laatuvaatimuksia biometaanille sekä kaasun lämpöarvomittalaitteille asetettuja sertifiointi- ja viranomaisvaatimuksia kyseisissä maissa. Opinnäytetyö toteutettiin Vaisala Oyj:lle, joka on maailman johtava sään, ympäristön ja teollisuuden mittausratkaisuihin erikoistunut yritys.

Tutkimustietoa kerättiin kohdemaiden viranomaislähteistä. Kun tietoa ei löytynyt julkisista dokumenteista, päädyttiin tietoa keräämään asiantuntijahaastatteluiden avulla. Tutkimus rajattiin Pohjois-Amerikkaan, Japaniin ja muutamaa suurimpaan Euroopan maahan.

Tutkimuksesta kävi ilmi, että maiden välisissä kaasuverkkojen laatuvaatimuksissa ja lämpöarvomittalaitteiden sertifiointivaatimuksissa on joitakin eroja, mutta ne ovat samantyyppiset. Esimerkiksi Saksassa kaasun lämpöarvomittalaitteilta vaaditaan Saksan metrologisen instituutin myöntämä tyyppihyväksyntätodistus, kun Alankomaissa riittää, jos toisessa maassa myönnetty sertifikaatti täyttää maakohtaiset vaatimukset. Sertifiointivaatimusten tarkempi tutkiminen on kuitenkin tarpeen.

Biometaanin laadun ja mittaustarkkuuden parantamisesta saatiin ristiriitaista tietoa. Asiantuntijoiden mukaan kaasun laatu on riittävän hyvä sen täyttäessä kaasuverkkojen maakohtaiset laatuvaatimukset. Toisaalta tiettyjen biometaanin sisältämien kemiallisten yhdisteiden, kuten CO_2 ja CH_4 , tarkemmalle mittaamiselle löytyy kysyntää, mikä puolestaan johtaisi myös tarkempaan lämpöarvon mittaukseen. Tässä tutkimuksessa ei saatu jatkokysymyksistä huolimatta selvitettyä, miksi tiettyjen kaasujen tarkempi mittaaminen on joillekin asiakkaille tärkeää, sekä miten biometaanin lopullinen hinta määräytyy. Näitä asioita olisi hyvä tutkia enemmän tulevaisuudessa.

Avainsanat: biometaani, mittaustarkkuus, lämpöarvomittalaite

Abstract

Author: Fredrik Helenelund
Title: Economic Value Gained from Improving The Quality and Measurement Accuracy of Biomethane
Number of Pages: 36 pages + 4 appendices
Date: 6 September 2022

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Energy and Environmental Technology
Professional Major: Energy Production Technologies
Supervisors: Juha Juselius, Senior lecturer
Antti Heikkilä, Product manager

The purpose of the thesis was to find out the financial viability of improving the quality and measurement accuracy of biomethane. In addition, the quality requirements of eight countries' gas networks for biomethane, as well as the certification and other requirements set for biomethane calorific value measuring devices in those countries were investigated. The thesis was commissioned by Vaisala Oyj, which is a world-leading company in the field of weather, environmental and industrial measurement solutions.

Research data was collected from official government sources in the target countries. When information could not be found in public documents, it was gathered through expert interviews. The study was limited to North America, Japan, and a few of the largest European countries.

The research revealed that there are some differences in the quality requirements of gas networks between countries and the certification requirements of calorific value measuring devices, but they have similarities. For example, in Germany, a type-approval certificate issued by the German Metrological Institute is required for gas calorific value measuring devices, while in the Netherlands, it is sufficient if a certificate issued in another country meets the country-specific requirements. However, a closer examination of the certification requirements is necessary.

Conflicting information was obtained about improving the quality and measurement accuracy of biomethane. According to experts, the quality of gas is good enough when it meets the country-specific quality requirements of gas networks. On the other hand, there is a demand for more accurate measurement of certain chemical compounds contained in biomethane, such as CO_2 and CH_4 , which in turn would also lead to more accurate calorific value measurement. Despite follow-up questions, it was not possible to ascertain why a more accurate measurement of certain gases is important for some customers, and how the final price of biomethane is determined. It would be good to study these issues further in the future.

Keywords: biomethane, measurement accuracy, calorific value measuring device

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Biokaasu ja biometaani	2
2.1	Biokaasun tuotanto	2
2.2	Biokaasun puhdistus ja jalostus biometaaniksi	4
2.3	Biokaasun mittaus	5
3	Mittaustekninen tausta	6
3.1	Todennäköisyysjakaumat	6
3.1.1	Normaalijakauma	8
3.1.2	Suorakaiteen muotoinen jakauma	10
3.1.3	Kolmionmuotoinen jakauma	12
3.2	Mittausepävarmuus ja mittausepävarmuusbudjetti	13
4	Markkinatutkimuksen teoria	15
4.1	Tiedonkeruu ja tutkimusmenetelmät	15
4.1.1	Laadullinen tutkimus	16
4.1.2	Määrällinen tutkimus	17
4.2	Haastattelu tiedonkeruumenetelmänä	17
4.3	Markkinatutkimuksen analyysi	19
5	Työn toteutus	22
5.1	Tiedonkeruu	22
5.2	Haastatteluaineiston analyysi	23
5.3	Mittausepävarmuus	25
6	Tulokset	28
6.1	Kaasuverkkojen laatuvaatimukset biometaanille	28
6.2	Kaasun laadun ja mittaustarkkuuden parantamisen kannattavuus	33
6.3	Mittausepävarmuuden pienentämisestä syntyvä taloudellinen hyöty	33
6.4	Mittalaitteelta vaadittava sertifiointi tai muu viranomaishyväksyntä	34
7	Yhteenveto	36

Liitteet

Liite 1: Haastattelukysymykset

Liite 2: Haastatteluvastausten analyysi

Liite 3: Kategorisoidut haastatteluvastaukset

Liite 4: Epävarmuusbudjetti

Lyhenteet

- ATEX:** *ATEX:* Yhteinen nimitys kahdelle räjähdyskelpoisten ilmaseosten hallintaa koskevalle eurooppalaiselle direktiiville.
- GUM:** *Guide to the expression of uncertainty in measurement:* ISO -organisaation laatima lähestymistapa mittausepävarmuuden määrittämistä varten.
- Mtoe:** *Megatonne of oil equivalent:* Mtoe -energiayksikkö vastaa energiamäärää, joka on sitoutunut miljoonaan tonniin öljyä.
- OIML:** *Internation Organization of Legal Metrology:* Hallitustenvälinen järjestö, joka edistää metrologisten menettelyjen maailmanlaajuisia yhdenmukaistamista.
- PTB** *Physikalisch-Technische Bundesanstalt:* Saksan kansallinen metrologinen instituutti.

1 Johdanto

Maailmanlaajuinen tietoisuus ilmaston lämpenemisestä ja sen seurauksista lisääntyy nopeasti. Kun ihmisten ymmärrys fossiilisten polttoaineiden haitoista kasvaa ympäri maailmaa, lisääntyy myös uusiutuvien energialähteiden, kuten biokaasun, kysyntä arvokkaana energialähteenä. Biokaasun suosion kasvaessa myös kaasun mittaussovelluksille on enemmän kysyntää.

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää, kuinka paljon lisäarvoa syntyisi siitä, että biometaanin laatua tai mittaustarkeyttä parannettaisiin. Lisäksi työssä tarkasteltiin eri maiden kaasuverkkojen laatuvaatimukset biometaanille ja kaasujen lämpöarvomittalaitteilta vaadittavat sertifiointit tai muut viranomaishyväksynät kyseisissä maissa.

Opinnäytetyö tehtiin Vaisala Oyj:lle, joka on maailman johtava sään, ympäristön ja teollisuuden mittausratkaisuihin erikoistunut yritys [1]. Vaisalalta löytyy uusi biokaasumittalaitteiden tuoteperhe, ja yritystä kiinnosti tietää, kuinka paljon rahallista hyötyä mittalaitteiden mittaustarkeyden parantaminen toisi. Vaisalaa kiinnostaa myös tietää, miten biometaanille ja sen mittaukseen tarkoitetuille mittalaitteille asetetut vaatimukset eroavat eri maissa.

2 Biokaasu ja biometaani

Biokaasu on kaasuseos, jota syntyy orgaanisten aineiden anaerobisen hajoamisen seurauksena. Biokaasu on koostumukseltaan noin 50–75 % metaania, 25–50 % hiilidioksidia ja pieniä määriä muita yhdisteitä, kuten esimerkiksi typpeä, vettä ja rikkivetyä. [2, s.18.]

Biokaasua käytettiin maailmanlaajuisesti noin 35 Mtoe edestä vuonna 2018. IEA:n ennusteen mukaan biokaasukulutuksen arvioidaan nousevan 75 Mtoe:n vuoteen 2040 mennessä. Biokaasua tuotetaan eniten Euroopassa ja Pohjois-Amerikassa, joissa sijaitsee noin 60 % maailmanlaajuisesta biokaasun tuotantokapasiteetista. Pelkästään Euroopassa on noin 20 000 biokaasulaitosta, ja niistä merkittävä osa sijaitsee Saksassa. [3.]

Vuonna 2018 noin 27 % biokaasusta käytettiin maailmanlaajuisesta rakennusten lämmittämiseen, 31 % käytettiin sähkön tuottamiseen ja 33 % käytettiin sähkön ja lämmön yhteistuotantoon. Loput 9 % biokaasusta jalostettiin biometaaniksi ja sekoitettiin kaasuverkkoihin, tai vaihtoehtoisesti käytettiin liikenteen polttoaineena. [4.]

2.1 Biokaasun tuotanto

Biokaasua voidaan tuottaa biokaasulaitoksissa varastoimalla orgaanisia aineita ilmatiiviisiin säiliöihin, joissa anaerobisille mikrobeille luodaan ihanteelliset hapettomat olosuhteet orgaanisten aineiden hajottamista ja biokaasun tuottamista varten. Nykypäivänä biokaasulaitokset käyttävät myös puhdistusprosesseja, jotka vähentävät kaasun hiilidioksidipitoisuutta. Mikrobit kuitenkin tuottavat metaanin lisäksi muitakin sivuaineita, kuten hiilidioksidia ja muita kaasuja. [5.]

Biokaasua voidaan myös tuottaa ottamalla talteen kaasua kaatopaikoilta. Kaatopaikoilla orgaaninen aine peitetään ja puristetaan kasaamalla jätettä kerroksittain. Näin orgaaninen aine joutuu hapettomaan tilaan, mikä puolestaan johtaa anaerobiseen mädätykseen ja metaanin tuotantoon. Tämä kaatopaikoilla

muodostuva metaani voidaan ottaa talteen tuotantopaikalla. Biokaasun talteenotto kaatopaikoilla on kuitenkin haastavaa, sillä metaani on räjähdysherkkää yhdistyessään hapen kanssa. Toinen ongelma on se, että kaatopaikoilta on vaikea ottaa kaikki metaani talteen. Kaatopaikkakaasussa on myös huomattavasti enemmän typpeä raakaan reaktorikaasuun verrattuna (taulukko 1), mikä vaikeuttaa sen jalostamista. Ylimääräinen metaani vapautuu ilmastoon, joka edistää ilmaston lämpenemistä. [5.]

Energiavirasto on määrittänyt kestävyyskriteerit biopolttoaineille, bionesteille ja biomassapolttoaineille, missä määritetään mm. mitä raaka-aineita niiden tuotannossa voidaan käyttää. Kasvihuonepäästövähennystä koskevat kestävyyskriteerit on puolestaan säädely kestävyyslain 6 §:ssä. Laki määrittää, kuinka paljon pienemmät biopolttoaineiden, biokaasun ja bionesteen kasvihuonepäästöjen täytyy olla korvattavaan fossiiliseen polttoaineeseen verrattuna. [6.]

Biokaasutuotannon ei katsota vaikuttavan kasvihuoneilmiöön, vaikka tuotannossa muodostuu hiilidioksidi- ja muita kasvihuonekaasuja. Päinvastoin, sen katsotaan auttavan vähentämään kasvihuonepäästöjä. Tämä johtuu siitä, että biometaanin tuotanto estää metaanin vapautumisen ilmakehään. Biokaasutuotanto vähentää myös muita kasvihuonepäästöjä, jotka vapautuisivat ilmakehään jos orgaaninen aine jätettäisiin hajoamaan luonnollisesti esimerkiksi kaatopaikalle. Tämän lisäksi biokaasutuotanto vähentää tarvetta fossiilisille polttoaineille, jotka ovat suurin ilmastoa lämmittävä tekijä. Myös polttopuun tarve vähenee biokaasutuotannon myötä, mikä auttaa säästämään metsiä, jotka puolestaan sitovat merkittäviä määriä hiilidioksidia. [5.]

Biokaasun koostumus vaihtelee sen tuotantotavan mukaan. Taulukosta 1 nähdään, että raaka reaktorikaasu, eli biokaasulaitoksessa tuotetun biokaasun metaanipitoisuus on usein korkeampi kuin kaatopaikkakaasulla. Korkeampi metaanipitoisuus on hyvä asia, koska se tarkoittaa, että kaasu on puhtaampaa. Sen polttamisesta muodostuu siis vähemmän haitallisia savukaasuja ja sen lämpöarvo on parempi. Kaatopaikkakaasu puolestaan sisältää usein enemmän typpeä ja epäpuhtauksia kuten rikkivetyä ja siloksaania.

Taulukko 1: Reaktori- ja kaatopaikkakaasun komponenttien tilavuusosuudet. [3, s. 18.]

Yhdiste	Raaka reaktorikaasu	Kaatopaikkakaasu
Metaani CH ₄ (V – %)	50–75	20–60
Hiilidioksidi CO ₂ (V – %)	25–50	25–50
Typpi N ₂ (V – %)	0–2	4–35
Hiilimonoksidi CO (V – %)	0–0,2	0–0,2
Happi O ₂ (V – %)	0–1	0,5–5
Vety H ₂ (V – %)	0–0,5	0–0,5
Rikkivety H ₂ S (V – %)	< 0,8	< 3
Ammoniakki NH ₃ ($\frac{\text{mg}}{\text{m}^3}$)	0–3	0–1
Siloksaanit ($\frac{\text{mg}}{\text{m}^3}$)	0–5	0–25
Halogenoidut hiilivedyt ($\frac{\text{mg}}{\text{m}^3}$)	0	0,2–7

2.2 Biokaasun puhdistus ja jalostus biometaaniksi

Kun biokaasu puhdistetaan, siitä poistetaan epäpuhtaudet kuten rikkivety ja siloksaanit. Kaasussa oleva rikkivety voi aiheuttaa korroosiota esimerkiksi kaasun siirtoputkissa. Tästä syystä biokaasu täytyy puhdistaa, jotta kaasua voitaisiin käyttää polttoaineena. Biokaasun puhdistustapa valitaan pääasiassa tuotetun kaasun investointikustannusten minimoinnin ja jalostusasteen tarpeen mukaan. Jalostusyksikön yhteydessä tehty rikinpoisto aktiivihillen avulla tai kaasuvälikamerin yhteydessä tehty vesihöyryn poisto ovat esimerkkejä tästä. [3, s.18-19.]

Puhdistuksen jälkeen biokaasu voidaan jalostaa. Jalostuksen tavoitteena on poistaa puhdistetussa biokaasussa jäljellä olevat inertit kaasut mahdollisimman tehokkaasti. Tällä tavalla jalostetun biokaasun, eli biometaanin volumetrinen energiatiheys ja energiatehokkuus paranee. Tämä mahdollistaa myös

biokaasun siirron joko paineistetuissa säiliöissä tai maakaasuverkkoa pitkin. [3, s. 20-21.]

Kun biometaania tuotetaan liikennekäyttöön, kaikkea biokaasussa olevaa hiilidioksidia ei poisteta, sillä pieni määrä hiilidioksidia metaanin seassa parantaa kaasun metaanilukua, joka on verrattavissa bensiinin oktaanilukuun. Korkeampi oktaaniluku vaikuttaa puolestaan positiivisesti polttomoottorin toimintaan. [3, s. 21.]

Sekä biokaasun puhdistus että sen jalostus biometaaniksi perustuvat samankaltaisiin prosesseihin, eli kemialliseen ja fysikaaliseen absorptioon sekä fysikaaliseen adsorptioon. Muita käytössä olevia jalostustekniikoita ovat mm. kryojalostus ja kalvojalostus. Puhdistus- ja jalostusteknologia määräytyy halutun lopputuotteen ja käyttökohteen mukaan. [3, s. 22.]

2.3 Biokaasun mittaus

Biokaasun analysointi ja biokaasutuotantolaitosten tehokkuuden parantaminen saavat yhä enemmän huomiota biokaasuteollisuuden kehittyessä [7].

Biokaasumittalaitteilla kaasun tuotantoprosessia voidaan hallita paremmin, jolloin vahingolliset metaanihävikit voidaan minimoida ja jalostusprosessi voidaan optimoida [8]. Biokaasumittalaitteiden tarkoituksena on siis sekä edistää kaasun tuotantotehokkuutta ja kuljetusvarmuutta että ehkäistä kasvihuonepäästöjä.

Kaasua jalostetaan, jotta sen energiatiheys, energiatehokkuus ja sitä kautta sen arvo kasvaa. Biokaasua jalostetaan myös siksi, että sitä voidaan puhdistettuna käyttää liikennepolttoaineena, sekä tehdä siitä vaihtokelpoista maakaasun kanssa jakeluverkkoon [9]. Tästä syystä käyttäjien on kiinnitettävä kaasun laatuun erityistä huomiota, sillä epätarkat mittaukset voivat johtaa rahallisiin tappioihin kaasun ostajalle tai myyjälle. Myös tästä syystä kaasun laadun mittaaminen on siis tärkeää. [7.]

3 Mittaustekninen tausta

Luotettavien mittausten kannalta mittausten pätevyyden, jäljitettävyyden ja tarkkuuden tunteminen on ratkaisevan tärkeää. Mittaamista sisältäviä tuotteita on valtavasti, eli mittausten luotettavuuden parantamisella on suuri taloudellinen merkitys. Prosentin virhe malmien metallimääryksissä tai jalometalliromun kulta- ja platinapitoisuuksissa voi johtaa valtaviin rahallisiin tappioihin. [10, s. 8.] Vastaavalla tavalla mittausrvirheet suurien biometaanikauppojen yhteydessä voivat tulla hyvin kalliiksi.

Mittausten pätevyydellä tarkoitetaan sitä, että mittaus on suoritettu oikein standardin määrittämällä tavalla. Mittauksen jäljitettävyydellä tarkoitetaan puolestaan mittaustuloksen tai mittanormaanin yhteyttä ilmoitettuihin referensseihin. Mittanormaali on mittausjärjestelmä, mittauslaite, kiintomitta tai vertailuaine, jolla ”määritellään, realisoidaan, säilytetään tai toistetaan suureen mittayksikkö tai suureen yksi tai useampi referenssiarvo”. [10, s. 8.] Mittauslaitteen tarkkuudella tarkoitetaan puolestaan laitteen kykyä antaa vasteita, jotka ovat lähellä tosiarvoa [10, s. 35].

3.1 Todennäköisyysjakaumat

Todennäköisyyslaskennassa tarkastellaan satunnaisilmiöitä, kuten esimerkiksi kuusitahoisien nopan heittoa tai tikan heittoa tauluun. Satunnaisilmiöstä saatua yksittäistä numeerista tulosta kutsutaan satunnaismuuttujaksi. Kaikki satunnaisilmiön mahdolliset tulokset muodostavat joukon, jota kuvataan todennäköisyysjakauman avulla. [11; 12.]

Kaasun mittauksessa on myös kyse satunnaisilmiöstä, jossa mittauslaitteen antamat yksittäiset mittaustulokset ovat satunnaismuuttujia. Mittaustuloksista koostuvaa satunnaisilmiötä voidaan siis kuvata todennäköisyysjakauman avulla. Mittaustulos on mittaussuureen arvon tarkin estimaatti. [10, s. 18]

Jos oletetaan, että esimerkiksi kaasun lämpöarvoa mitataan ja jokaista yksittäistä mittausta kuvataan muuttujalla x , saadaan yksittäiset lämpöarvot

$x_1, x_2, x_3 \dots x_n$, jossa n on mittausten määrä. Mitatuille arvoille voidaan tämän jälkeen laskea keskiarvo kaavalla

$$\mu = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{N} \sum x_i \right), \quad (1)$$

jossa muuttuja x_i on satunnaismuuttujasta x tehty yksittäinen havainto. Kun havaintoja on äärellinen määrä N , keskiarvon estimaatti on otoskeskiarvo \bar{x} :

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i. \quad (2)$$

Standardipoikkeama eli hajonta merkitään muuttujalla σ . Hajonta kuvaa jakauman leveyttä ja se määritetään raja-arvona kaavalla

$$\sigma = \lim_{N \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\sum (x_i - \mu)^2}{N}}. \quad (3)$$

Kun havaintoja on äärellinen määrä N , hajonnan estimaatti on otoskeskihajonta s :

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{N-1}}. \quad (4)$$

Tällä tavalla laskettuna otoskeskihajonta kuvaa hajontaa, johon mahtuu 68 % tehdyistä havainnoista [13.]. Mikäli hajonnan estimaattina käytetään arvoa $s = 1,96$, mahtuu 95 % havainnoista hajonnan sisälle. [14.]

Otoskeskihajonta ilmoittaa siis alueen, johon seuraava toistomittauksen tulos osuu tietyllä todennäköisyydellä. Jos mittaus toistetaan tarpeeksi monta kertaa, niin tulosten epätarkkuutta voidaan arvioida suorittamalla useita mittaussarjoja ja laskemalla niille otoskeskiarvo \bar{x} . Koska arvot vaihtelevat satunnaisesti, voidaan niille tämän jälkeen laskea uusi otoskeskiarvo ja otoskeskihajonta, jolloin laskettu otoskeskihajonta kuvaa aluetta, johon seuraavan mittaussarjan keskiarvo osuu tietyllä todennäköisyydellä. [13.]

Arvio keskiarvon epätarkkuudelle on kuitenkin laskettavissa jo yhden mittaussarjan perusteella. Kyseistä arviota kutsutaan keskiarvon keskivirheeksi $\Delta\bar{x}$. Keskiarvon keskivirhe on riippuvainen otoskeskihajonnasta

$$\Delta\bar{x} = \frac{s}{\sqrt{N}}. \quad (5)$$

Keskiarvon \bar{x} epätarkkuuden arvio $\Delta\bar{x}$ saadaan tämän jälkeen laskettua kaavalla

$$\Delta\bar{x} = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{N(N-1)}}. \quad (6)$$

Keskiarvon keskivirhe kertoo alueen, jolle mittaussarjan keskiarvo osuu 68 %:n todennäköisyydellä. Kaavasta (6) nähdään, että keskiarvon keskivirhe Δx pienenee, kun havaintojen määrä N kasvaa. Lopputuloksen tarkkuutta voidaan siis parantaa suorittamalla pidempiä mittaussarjoja. [13.]

3.1.1 Normaalijakauma

Satunnaisia virheitä käsitellessä oletuksena on tavallisesti, että mittaustulokset jotka on toistettu samoissa olosuhteissa noudattavat normaalijakaumaa

$$G(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}, \quad (7)$$

missä muuttuja μ kuvaa jakauman keskiarvoa ja muuttuja σ jakauman hajontaa. [13.]

Normaalijakaumaa käytetään usein fysiikan mittaustulosten käsittelyssä, koska se soveltuu hyvin monien erilaisten mittaussarjoista saatujen tulosten jakaumalle. Normaalijakaumassa otoskeskiarvo x on jakauman keskiarvon paras mahdollinen estimaatti. [13.]

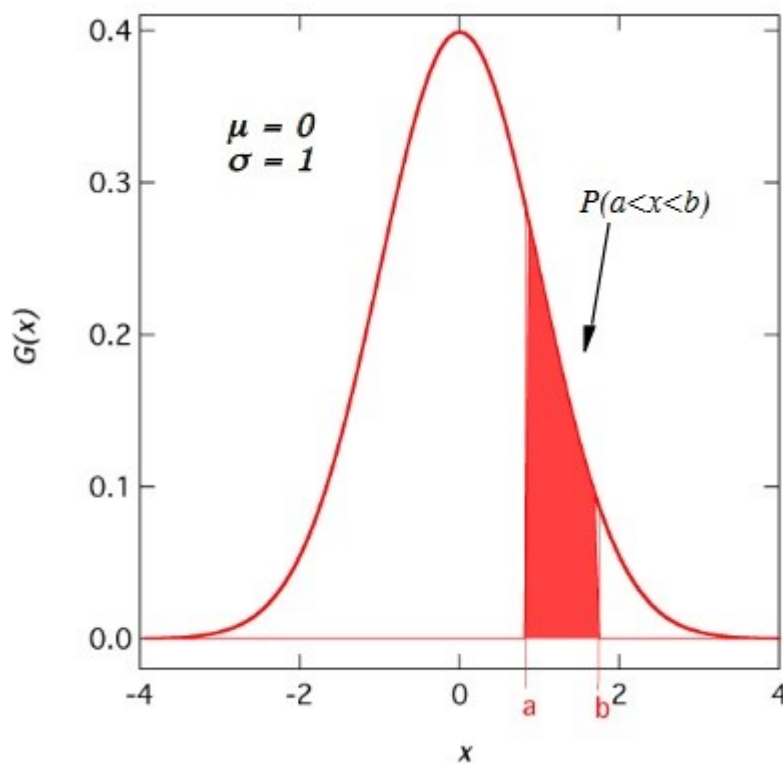
Normaalijakaumaa voidaan myös tulkita todennäköisyystiheudeksi. Tässä tapauksessa todennäköisyys sille, että havaintotulos normaalijakautuneelle satunnaisilmiölle pienellä välillä $(x, x + dx)$ on

$$dP = G(x)dx. \quad (8)$$

Integroimalla yhtälö (8), saadaan todennäköisyys sille, että havaintotulos on välillä (a, b) :

$$P(a < x < b) = \int_a^b G(x)dx, \quad (9)$$

Tämä todennäköisyys on saman suuruinen kuin kuvan 1 pinta-ala, joita rajoittavat suorat $x = a$ ja $x = b$, x-akseli sekä käyrä $G(x)$. [13.]



Kuva 1: Todennäköisyyden laskeminen silloin, kun yksittäinen havaintotulos normaalijakautuneessa satunnaisilmiössä on välillä (a,b) . [13.]

Jos yhtälöön (7) halutaan tehdä muuttujanvaihdos $z = \frac{x-\mu}{\sigma}$, Gaussin jakauma saadaan muotoon

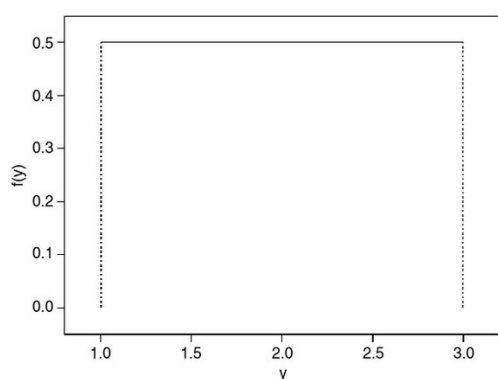
$$G(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}}. \quad (10)$$

Havaintoaineiston keskiarvon ollessa $\mu = 0$ ja hajonnan ollessa $\sigma = 1$, kaava (10) vastaa normaalijakaumaa. Mikä tahansa $G_{\mu,\sigma}(x)$ -jakauma voidaan tämän jälkeen muuttaa $G_{0,1}(z)$ -jakaumaksi muuttujanvaihdoksen (9) avulla. Tämä on hyödyllistä sen takia, että jakaumaa $G(z)$ ei tavallisesti voida integroida suljetussa muodossa. [13.]

3.1.2 Suorakaiteen muotoinen jakauma

Normaalijakauma ei kuitenkaan ole tarkoin mahdollinen vaihtoehto kaikkien mittaussarjojen kuvaamiseen. Jos esimerkiksi kaikki mittaustulokset kahden käännepisteen välillä ovat yhtä todennäköisiä, ne noudattavat suorakaiteen muotoista jakaumaa $p(x) = (b - a)$, $a \leq x \leq b$ ja $p(x) = (x - a)/(b - a)$. Suorakaiteen muotoinen vakiojakauma määritetään erikoistapauksella, jossa $a = 0$ ja $b = 1$, joka voidaan merkitä $U(0,1)$. [15, s. 221.]

Suorakaiteen muotoisessa jakaumassa todennäköisyys, että lopputulos putoaa mihin tahansa väliin, riippuu vain välin pituudesta. Esimerkiksi laskimien generoimat satunnaisluvut perustuvat tähän jakaumaan. Suorakaiteen muotoisella jakaumalla on kaksi parametria, jotka ovat mahdollisten arvojen äärellisten välien loppupisteitä. Satunnaismuuttujan tiheysfunktio välillä $[a,b]$ on suorakaiteen muotoisessa jakaumassa $f(y) = \frac{1}{b-a}$, kun $a \leq y \leq b$. Kuvasta 2 nähdään, miltä tiheysfunktion kuvaaja näyttää kun $[a,b] = [1,3]$. [15, s. 106.]



Kuva 2: Satunnaismuuttujan tiheysfunktio suorakaiteen muotoisessa jakaumassa, kun $[a,b] = [1,3]$. [16, s. 106.]

Satunnaismuuttujalla $U(0,1)$ on yksinkertaisuudestaan huolimatta suuri merkitys tilastotieteissä ja -sovelluksissa, koska sen jakaumafunktion avulla mikä tahansa satunnaismuuttuja x jakaumasta D voidaan muuntaa tehokkaasti satunnaismuuttujaksi u , jos $f_D(x)$ ja $F_D(x)$ ovat todennäköisyysjakaumafunktio ja jakaumafunktio muuttujalle x , niin $y = F_D(x)$ on jakautunut jakauman $U(0,1)$ mukaan. [15, s. 222.]

Suorakaiteen muotoinen jakauma on myös perusta algoritmeille ja menetelmille, joilla generoidaan mihin tahansa muuhun jakautumisfunktioon liittyvät satunnaismuuttujat, joko kääntämällä jakaumafunktio esimerkiksi $F_D^{-1}(u) \rightarrow x$, tai muilla keinoin. Useimmat tietokonekielet ja ohjelmointijärjestelmät sisältävät lisäksi yhden tai useamman generoivan funktion tasaisen jakauman näennäissatunnaisille arvoille, funktioiden nimillä kuten "RND", "RANF" ja "RANDU". [15, s. 222.]

Suorakaiteen muotoisen jakauman momentit $U(a, b)$ ovat $\mu = (a + b)/2$; $\sigma^2 = (a - b)^2/12$; $\gamma_1 = 0$; $\gamma_2 = -6/5$, jossa muuttuja μ on mediaani. Arvojen $(1, 2, \dots, N)$ sanotaan noudattavan diskreettiä tai kokonaislukuista koostuvaa suorakaiteen muotoista jakauma $R(1, N)$, jos kunkin arvon esiintymistodennäköisyys on $p(x) = 1/N$. Jakaumafunktio on tässä tapauksessa $P(x) = x/N$ ja momentit: $\mu = (N + 1)/2$; $\sigma^2 = (N^2 - 1)/12$; $\gamma_1 = 0$; $\gamma_2 = -\frac{6}{5} \cdot (N^2 + 1)/(N^2 - 1)$. [15, s. 222.]

Suorakaiteen muotoinen jakauma on yleisin epävarmuusanalyseissä käytetty todennäköisyysjakauma. Tämä johtuu siitä, että se kattaa suurimman osan epävarmuustekijöistä. Kun on epäselvää minkä jakauman mukaan mittausarjan arvot ovat jakautuneet, on parasta tehdä konservatiivinen arvio. Tässä tapauksessa suorakaiteen muotoinen jakauma on siis hyvä vaihtoehto. Suorakaiteen muotoisen jakauman epävarmuustekijät muutetaan keskihajonnan mukaisiksi kaavalla

$$u_i = \frac{U_i}{\sqrt{3}}. \quad [17.] \quad (11)$$

3.1.3 Kolmionmuotoinen jakauma

Kun halutaan mallintaa kvalitatiivisesti epävarmoja muuttujia, joita voidaan rajoittaa kahden rajan väliin, käytetään kolmionmuotoista jakaumaa. Esimerkiksi mittauksen tai muun aktiviteetin kestoa voidaan kuvata tiheysfunktion (12)

$$f_X(x) = \begin{cases} \frac{2}{b-a} \left(\frac{x-a}{c-a} \right) & a \leq x \leq c \\ \frac{2}{b-a} \left(\frac{b-x}{b-c} \right) & c \leq x \leq b \end{cases} \quad (12)$$

mukaan, missä muuttuja a on arvon alaraja, muuttuja b on arvon yläraja ja muuttuja c on moodi. Kolmionmuotoisen jakauman jakaumafunktio saadaan puolestaan kaavalla

$$F_X(x) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ \frac{(x-a)^2}{(c-a)(b-a)} & a \leq x \leq c \\ 1 - \frac{(b-x)^2}{(b-c)(b-a)} & c \leq x \leq b \\ 1 & x \geq b \end{cases} \quad (13)$$

Jakaumafunktion (13) kumulatiivinen käänteisarvo (14) voidaan puolestaan laskea kaavalla

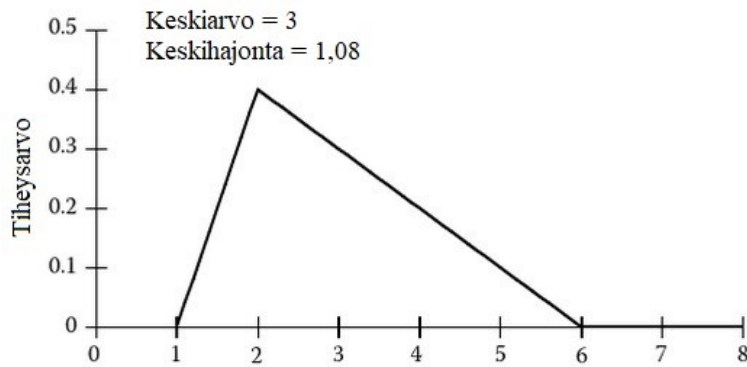
$$x = \begin{cases} a + \sqrt{(F_X)(c-a)(b-a)} & 0 \leq F_X \leq \frac{c-a}{b-a} \\ a - \sqrt{(1-F_X)(b-c)(b-a)} & \frac{c-a}{b-a} \leq F_X \leq 1 \end{cases} \quad (14)$$

ja kaavat (15; 16)

$$m_X = \frac{a+b+c}{3} \quad (15)$$

$$s_X^2 = \frac{a^2+b^2+c^2-ab-ac-bc}{18} \quad (16)$$

puolestaan kuvaavat jakauman keskiarvoa (μ) ja varianssia (σ^2). Kuvassa 3 on esitetty kolmionmuotoisen jakauman todennäköisyystiheysfunktio, kun $a = 1$, $b = 6$ ja $c = 2$. [18, s. 154-155.]



Kuva 3: Kolmionmuotoisen jakauman todennäköisyystiheysfunktio. [18, s. 155.]

Kolmionmuotoinen jakauma on siis hyödyllinen sellaisissa tapauksissa, kun jakauman ala- ja yläraja ovat tiedossa, mutta niiden keskiarvo on epävarma. Sitä käytetään tyypillisesti silloin, kun tietoa on saatavilla rajoitetusti.

Kolmionmuotoisen jakauman epävarmuustekijät muutetaan keskihajonnan mukaisiksi kaavalla

$$u_i = \frac{U_i}{\sqrt{6}}. \quad [16.] \quad (17)$$

3.2 Mittausepävarmuus ja mittausepävarmuusbudjetti

Mittausepävarmuus määritetään SFS 3700 -standardissa mittaustulokseen liittyväksi parametriksi, joka kuvaa mittaussuureen arvojen oletettua vaihtelua [19]. Mittausepävarmuuteen sisältyy yleensä monia eri tekijöitä. Osa niistä ovat arvioitavissa mittaussarjoista saatujen arvojen tilastollisesta jakaumasta, jolloin niitä voidaan kuvata keskihajonnan avulla. Muut komponentit jotka eivät kuulu aikaisemmin mainittuihin mittaussarjoihin, voidaan myös kuvata standardipoikkeaman avulla. Kyseisiä komponentteja arvioidaan todennäköisyysfunktioita hyödyntäen esimerkiksi kokemuksen tai muun tiedon perusteella. [20, s.5.] Kaasunmittauksen tapauksessa epävarmuuskomponentteja voidaan löytää mm. International Organization of Legal Metrology:n laatimista ohjeista. OIML R140 -dokumentti määrittää kansainväliset kaasumaisten polttoaineiden mittausjärjestelmät. [21.]

Mittaussuuretta mitatessa halutaan määrittää suureen todellinen arvo. Mittaukseen vaikuttavista tekijöistä johtuen syntyy kuitenkin väistämättä viireitä. Mittausvirheisiin vaikuttavia asioita ovat mm. inhimilliset tekijät, ympäristö, mittauskohde, mittauslaite ja mittaustapa. Nämä asiat vaikuttavat vuorostaan mittausepävarmuuteen. Mittaussuuretta määrittäessä aikaisemmin mainitut epävarmuustekijät täytyy siis ottaa huomioon, jotta mittausepävarmuus voidaan arvioida tarkasti. Tämä on ainut tapa miten voidaan näyttää, kuinka lähelle mittaussuureen todellista arvoa ollaan päästy. Mittaustulokseen ei voida luottaa ilman, että mittauksen mittausepävarmuus on tiedossa. [22, s.57.]

Mittauksen riippumattomat muuttujat voidaan tunnistaa, määrittää ja luonnehtia epävarmuusbudjetin avulla. Mittausepävarmuusbudjetti on taulukko, jossa listataan mittaustulosten epävarmuuteen vaikuttavat komponentit tai tekijät. Mittauksen laadun kannalta epävarmuusbudjetti on välttämätön työkalu epävarmuusanalyysijä tehdessä. Mittausepävarmuusbudjetin päätavoitteena on mittausepävarmuuden laskeminen jäsenneltyä ja hyvin organisoitua lähestymistapaa käyttäen. Sen avulla analyysiprosessi voidaan myös tallentaa ja halutessa jakaa, jotta muut ammattilaiset voivat validoida tulokset. [23.]

Liitteessä 1 on esitetty esimerkki siitä, miten epävarmuusbudjetti voidaan rakentaa. Mittausmallin syöttösuureet ovat taulukon sarakkeessa 1. Syöttömäärien arviot tai arvio syöttösuureiden arvojen alueista ovat sarakkeessa 2. Sarakkeessa 3 ovat GUM:n mukaisesti lasketut standardiepävarmuuden arvot mittausten tai muiden saatavilla olevien ennakkotietojen avulla. Epävarmuusarvioinnin tyyppi ilmoitetaan sarakkeessa 4 ja syötesuureiden herkkyykertoimet $c_i = \frac{\partial F}{\partial x_i}$ sarakkeessa 5. Sarakkeessa 6 ovat puolestaan syöttösuureiden $u_i(y_q) = \left| \frac{\partial F}{\partial x_i} \right| \cdot u(x_i)$ lisäarvot yhdistettyyn standardiepävarmuuteen nähden. Mittaustulosten yhdistetty standardiepävarmuus lasketaan kaavalla $u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2(y)}$, kun syöttösuureiden estimaatit eivät korreloi. [24, s.39-40.]

4 Markkinatutkimuksen teoria

Markkinatutkimus on tapa tutkia ja vastata ihmisten käyttäytymiseen liittyviin kysymyksiin. Markkinatutkimuksen tärkein tehtävä organisaatioissa on helpottaa johtajien päätöksentekoa, tarjoamalla luotettavaa tietoa. Tutkimusprosessiin kuuluu tiedon keräämisen ja analyysin lisäksi, myös kyky kommunikoida ja tulkita tulokset tavalla, joka auttaa muita hyödyntämään niitä. [25, s.37]

Tutkimusta tehdessä on tärkeää kyetä tunnistamaan tutkimusongelman ydinkysymykset, sekä mitkä todisteet voivat parhaiten tukea parempaa päätöksentekoa. Toinen tärkeä taito tutkimusta tehdessä on kyky tehdä kompromisseja tutkimuksen suunnittelun välillä siten, että kerätään riittävän luotettavaa dataa tukemaan tehtävää päätöstä, mutta joka ei vie enemmän aikaa ja resursseja kuin päätös oikeuttaa. [25, s. 37-38.]

Markkinatutkimukset luokitellaan usein joko laadullisiksi tai määrällisiksi tutkimuksiksi. Määrällisissä tutkimuksissa käytetään suuria otoksia ja strukturoituja kyselylomakkeita, joita voidaan verrata tunnettuun universumiin. Laadullisissa tutkimuksissa käytetään tyypillisesti suhteellisen rakenteettomia haastatteluja tai keskusteluryhmiä, joissa on mahdollista tutkia ja seurata ideoita yksityiskohtaisemmin. [25, s. 38.]

4.1 Tiedonkeruu ja tutkimusmenetelmät

Tutkimuksen tiedonkeruu voidaan jakaa kahteen pääkategoriaan. Nämä ovat ensisijainen ja toissijainen tutkimustieto. Toissijaisilla lähteillä viitataan tietoon, jota on alun perin kerätty toista tarkoitusta varten. Esimerkkejä toissijaisista lähteistä ovat hakukoneet, tietokannat ja eri hallitusten verkkosivut. Toissijaista tietoa kannattaa aina kerätä ensin, sillä se on usein paljon halvempaa kuin pääasiallinen tutkimustoiminta. [26, s. 16.]

Ensisijainen tutkimustieto viittaa tietoon, jota kerätään erityisesti tehtyä tutkimusta varten. Ensisijainen tutkimustieto kerätään usein sen jälkeen, kun toissijaisista lähteistä ei enää löydetä lisää tietoa. Suurin ero näiden

tiedonkeruumenetelmien välillä on, että ensisijainen tutkimustieto mahdollistaa tutkimusmetodiikan valinnan. Ensisijaisen tutkimustiedon suurin rajoittava tekijä on sen hinta ja siihen kuluva aika. Esimerkkejä ensisijaisesta tutkimustiedosta ovat sähköpostikyselyt, haastattelut, ihmisten tai koneiden tekemät havainnot ym. Tutkimustiedon kerääminen voi myös olla haastavampaa yllä mainituilla tavoilla, sillä asiakkaita voi olla vaikea suostutella osallistumaan tutkimukseen. [26, s. 17.]

Itse tutkimustieto voidaan myös jakaa kahteen kategoriaan: laadulliseen ja määrälliseen tietoon. Laadullinen tieto on usein vähemmän jäsenneltyä ja se perustuu usein suulliseen tietoon mittausten sijasta. Määrällinen tieto on puolestaan hyvin jäsenneltyä ja perustuu usein suuriin määriin tietoa esimerkiksi väestötasolla. [26, s. 18-19.]

4.1.1 Laadullinen tutkimus

Laadullinen tutkimus on termi jota käytetään monille erilaisille tutkimuksissa käytetyille lähestymistavoille ja menetelmille. Kerätyt ja analysoidut tiedot ovat pääasiassa ei-kvantitatiivisia, ja ne voivat koostua mm. haastattelujen kopioista, kenttämuistiinpanoista ja asiakirjoista. [27, s. 3.]

Laadullisilla tutkimuksilla voi olla useita eri tavoitteita tutkimuksesta riippuen. Tulokset koostuvat usein olennaisimmista esityksistä ja analyttisen synteessin merkittävimpien löydösten esittelemisestä. Näitä voivat olla mm. erilaisten tutkimuskohteiden tehokkuuden arviointi, uudet oivallukset eri tieteenaloilla tai vaikka taiteellisten esitystapojen inhimillisen merkityksen selvittäminen. Laadullisia tutkimuksia tehdään useilla eri tieteenaloilla, kuten esimerkiksi viestintä-, terveydenhuolto-, oikeustieteiden- ja liiketoiminta-alalla. [27, s. 4.]

Seuraavat tekijät on laajalti tunnistettu tärkeiksi laadullisten tutkimusten tiedonkeruussa:

- Tunnistetaan ja tutkitaan runsaasti tietoa sisältäviä sivustoja, tapauksia tai informantteja.

- Etsitään näytteitä havaintojen tai vastausten heterogeenisyyttä varten.
- Tehdään ajan ja budjetin mukaiset rajaukset.
- Luodaan kehyksiä keskeisten prosessien tai rakenteiden paljastamista, vahvistamista tai hyväksymistä varten.
- Tietoa kerätään ja analysoidaan, kunnes ei ole enää mitään uutta opittavaa. [27.]

4.1.2 Määrällinen tutkimus

Määrällisessä tutkimuksessa tutkitaan suuria määriä numeerista dataa ja sen muutosta. Yksi tutkijan tärkeimmistä tehtävistä määrällisessä tutkimuksessa on ymmärtää dataa, jonka kanssa työskennellään. Tutkijan on arvioitava tutkimusdataa epärehellisten tietojen, epätyypillisten pistemäärien ja tilastovaatimusten asianmukaisen käytön rikkomisen varalta. On myös tärkeää, että tutkija ymmärtää tietojoukkonsa ainutlaatuisuuden tarkastelemalla tyypillisiä pisteitä, pistemäärän vaihteluita sekä aineiston muuttujiin liittyvien pistemäärien jakautumien ominaisuuksia. [28 ,s.6.]

Määrälliset menetelmät tarjoavat vahvan kehyksen monimutkaisten ja kontekstualisoitujen ilmiöiden tutkimiselle. Jotta tutkittavaa ilmiötä voitaisiin paremmin ymmärtää, tulisi tutkijoiden hyödyntää erilaisia tutkimusmenetelmiä ja lähestymistapoja. Käytetyt tutkimusmenetelmät määräytyvät tutkimuskysymyksen perusteella, eli tutkijat valitsevat sopivimman menetelmän tai työkalun tutkimuskysymyksen vastaamiseen. [29, s.121-122]

4.2 Haastattelu tiedonkeruumenetelmänä

Monissa laadullisissa tutkimuksissa käytetään haastatteluita tiedonkeruumenetelmänä. Haastattelut ovat tehokas tapa kysyä ja dokumentoida yksilön tai ryhmän näkemyksiä, mielipiteitä, asenteita ja uskomuksia tutkimusaiheesta. Tutkimusaihe, tutkimuksen tavoitteet ja haastattelukysymykset muodostavat perustan käsitellyille aiheille ja haastattelun aikana esitetyille kysymyksille. [27, s.32-33.]

Haastatteluformaatit voivat koostua tarkasti valmistelluista ja erittäin jäsenellyistä kysymyksistä, jotka esitetään jokaiselle haastateltavalle taholle tietyssä järjestyksessä. Vaihtoehtoisesti voidaan myös käyttää strukturoimatonta haastatteluformaattia, jossa ennalta määritettyjä kysymyksiä ei ole, vaan kysymykset muodostetaan spontaanisti aihealueen mukaan. [27, s.32-33.]

Haastattelut voidaan järjestää yhden tai useamman henkilön, parin, perheen tai useamman kohderyhmänä järjestäytyneen henkilön kanssa. Tilanteesta riippuen haastateltavia henkilöitä voidaan haastatella yhden tai useampia kertoja kenttätyöjakson aikana. [27, s.33.]

Strukturoitu haastattelu on laadullisissa tutkimuksissa käytetty tiedonkeruumenetelmä, jossa haastattelija lukee kysymykset tietyssä järjestyksessä ja kirjaa ylös vastaajan vastaukset. Kyselyjä tehdään tällä tavalla mm. siksi, että ne tarjoavat haastattelijalle enemmän hallintaa vastausten lukumäärää ajatellen, koska haastattelijan läsnäolo voi vähentää tiettyjen kysymysten vastaamiseen kieltäytymisten lukumäärää. [30, s.129.]

Tutkimusten tavoitteena on kertoa, mitä ja miksi jotakin tapahtuu. Laadullisen tutkimuksen kannalta on myös tärkeää kehittää yksityiskohtaista ymmärrystä yksilöiden näkemyksistä, asenteista ja käytöksestä. Laadullisen tutkimuksen tiedon keruu on vähemmän jäsenelty kuin kvantitatiivisessa tutkimuksessa. Haastatteluun tai kyselyyn vastaavalle henkilölle halutaan antaa mahdollisuus puhua tunteistaan, asenteistaan, uskomuksistaan ja arvoistaan. [30, s.141.]

Keskeinen ongelma haastatteluiden kanssa on, että haastateltavat saattavat ymmärtää haastattelukysymykset eri tavalla. Haastatteluissa on usein pidempiä kysymyksiä kuin esimerkiksi kyselyissä, jolloin on myös enemmän sanoja jotka voidaan mahdollisesti ymmärtää väärin. Haastattelijan ja tutkijan on siis tärkeä muistaa, että vaikka kysymykset esitettäisiin täysin samalla tavalla kaikille vastaajille, niin ei voida olettaa, että kaikki vastaajat ymmärsivät samat sanat samalla tavalla. [31, s.35.]

Haastattelut ja haastattelukysymykset voidaan luokitella usealla eri tavalla. Seuraavat tekijät ovat erityisen tärkeitä haastattelukysymysten suunnittelun kannalta:

- Millaisia kysymyksiä kysytään?
- Kuinka strukturoituja kysymykset ovat?
- Miten haastattelut järjestetään: kasvotusten, puhelimen välityksellä vai sähköpostitse?
- Haastattelun sosiaaliset olosuhteet, esimerkiksi yksilö- vai ryhmähaastattelut?
- Missä määrin tutkija luo haastattelutekstin yhdessä haastateltavan kanssa?
[29, s.36.]

Haastattelut ovat tehokas tiedonkeruumenetelmä monenlaisiin tutkimuksiin. Se, kuinka tehokkaita ne ovat, riippuu tutkimuskohteiden ominaisuuksista, esitetyistä kysymyksistä, tutkimuskysymysten edellyttämistä yleistyksistä sekä haastattelutavasta. [31, s.36.]

4.3 Markkinatutkimuksen analyysi

Jotta analysoitavaa aineistoa voidaan muodostaa, esimerkiksi vastaajilta kerätyt tiedot täytyy tallentaa ja muokata. Laadullisessa työssä tekstin tuottaminen haastattelun pohjalta on esimerkki tästä. Analyysin helpottamiseksi jokaiselle mahdolliselle vastaukselle tulee antaa eri koodi. Tämän jälkeen tarkistetaan tietojen täsmällisyys ja johdonmukaisuus. Mahdollisten ongelmien ilmetessä voidaan vastaaja tarpeen vaatiessa kutsua takaisin tarkastamaan tiedot. [32, s.80.]

On tärkeää käyttää aikaa tietojen omaksumiseen analyttisten vaiheiden kautta. Haastatteluiden aikana saattaa ilmaantua uusia ideoita tai lisäkysymyksiä.

Nämä asiat on hyvä kirjata ylös pian haastattelun jälkeen esimerkiksi seuraavalla tavalla:

- Tehdään haastattelun jälkeinen pohdinta.
- Järjestetään ja tallennetaan tiedot.
- Luodaan luettelo temaattisten koodien tallentamista varten.
- Tarkistetaan haastatteluosuotteiden oikeellisuus.

Haastattelun jälkeisessä pohdinnassa merkityksellisiä ovat myös haastattelijan ja osallistujan välisen vuorovaikutuksen kohdat. Ne tulee huomioida tietojen analysoinnissa ja myöhemmissä haastatteluissa. [33, s.120-121.]

Analyysin seuraava vaihe on haastatteluaineiston organisointi. Ensin kerätty tieto täytyy järjestää siten, että sitä voidaan analysoida. Tähän sisältyy merkintäprosessi, joka ei liitä osallistujien nimiä tiedonkeruuvälineisiin, sekä myös tietojen tallentamisen turvalliseen paikkaan. Tämän jälkeen haastatteluaineisto on valmis analysoitavaksi. [33, s.121.]

Haastatteluaineiston lukeminen, organisointi ja kirjoittaminen on analyysin varhainen vaihe. Tässä vaiheessa tietyt tutkimuskysymystä käsittelevät avainaiheet ilmenevät. Analyysi sisältää näiden asioiden paikallistamisen, ja merkitsemisen koodeiksi. Koodit tallennetaan niiden ilmaantuessa, minkä jälkeen niiden merkitystä tutkitaan. [33, s.122.]

Koodidokumentaatioita voidaan ylläpitää esimerkiksi ohjelmistojen ja omien muistioiden avulla. Koodit tulee nimetä tai merkitä huolellisesti, jotta ne heijastavat koodin sisältämää tietoa. Koodi voi esimerkiksi olla yksi sana. Muita koodia kuvaavia tietoja voivat olla esimerkiksi, mikä koodin suhde on muihin tallennettuihin koodeihin, miten koodia käytetään ja tarkennukset koodin merkityksestä. [33, s.122.]

Koodien säännöllisyys on huomioitava analyysissä, mutta koodin säännöllinen esiintyminen ei ole edellytys sen käyttämiselle. Koodit täytyy ottaa vakavasti, eikä niitä pidä automaattisesti hylätä vaikka ne poikkeaisivat muista koodeista. Koska laadullisessa tutkimuksessa kiinnitetään enemmän huomiota kerätyn tiedon tuottamaan merkitykseen, eikä niinkään tiedon määrään, niin jokainen koodi tulee tallentaa ja sen suhdetta tutkimuskysymykseen tutkia huolellisesti analyysin aikana. [33, s.124.]

Kerätyn tiedon analysointia voidaan helpottaa merkittävästi panostamalla tietojen organisointiin. Koodit jotka liittyvät toisiinsa, merkitään, jolloin niille muodostuu omat kategoriat. Tämän jälkeen pohditaan, mitä tutkimustietojen välinen yhteys tarkoittaa. Tiedon analysointi on iteratiivinen prosessi, jota toistetaan jatkuvasti kunnes koko aineisto on käyty läpi. Lopulta tehdään tutkimustulosten synteesi, jossa tehdyt johtopäätökset esitetään. [33, s.144-145.]

Tutkimustulosten synteesisissä analysoidut tiedot yhdistetään yhdeksi tai useaksi käsitteelliseksi viitekehyykseksi. Synteessin tavoitteena on tuoda esiin tutkimustiedosta kerätty merkitys, joka antaa vastauksen tutkimuskysymykseen. Tämän jälkeen tutkimustulosten johtopäätökset ja havainnot voidaan esittää. [33, s.171-172.]

5 Työn toteutus

Opinnäytetyössä selvitettiin kahdeksan eri maan kaasuverkkojen laatuvaatimuksia biometaanille, sekä mittalaitteilta vaadittua sertifiointia tai muuta viranomaishyväksyntää kyseisissä maissa. Tutkimuskohteina olevat maat olivat Espanja, Iso-Britannia, Italia, Japani, Kanada, Ranska, Saksa ja Yhdysvallat. Näiden maiden lisäksi haastateltiin asiantuntijoita myös Alankomaista ja Belgiasta. Rajaamalla työ kyseisiin maihin, aiheesta saataisiin tehtyä kattava analyysi tekemättä tutkimuksesta aivan liian laajaa. Tutkimus oli alun perin tarkoitus saada valmiiksi vuoden 2022 toukokuussa. Tiedonkeruussa oli kuitenkin suuria haasteita, minkä takia tutkimuksen aikataulu venyi vuoden 2022 syyskuuhun asti.

Opinnäytetyössä käytettiin laadullista tutkimusmenetelmää, sillä haastatteluaineistoa oli hyvin rajoitettu määrä. Tutkimuksen osallistujilta haluttiin myös ei-numeerista dataa, jonka analysointiin laadullinen tutkimusmenetelmä soveltuu paremmin.

5.1 Tiedonkeruu

Tietoa kaasuverkkojen laatuvaatimuksista kerättiin kohdemaiden virallisilta verkkosivuilta. Myös kaasun lämpöarvomittalaitteiden sertifiointiin liittyvää tietoa yritettiin löytää verkosta. Kyseistä tietoa oli kuitenkin vaikea löytää, ja tästä syystä tietoa päätettiin kerätä haastatteluiden avulla. Tiedonkeruuta vaikeutti myös se, että vaatimukset on dokumentoitu kohdemaiden omilla kielillä. Tästä syystä tietojen löytämiseksi ja tulkitsemiseksi jouduttiin käyttämään Google Translate -palvelua.

Tietoa biokaasumittalaitteiden sertifiointiin liittyen sekä mittaustarkkuuden ja biokaasun puhtauden vaikutusta kaasun rahalliseen arvoon, kerättiin haastattelemalla alan asiantuntijoita. Vastaukset kirjattiin ylös ja numeroitiin Excel-taulukon, minkä jälkeen kerättyä tietoa analysoitiin.

Haastattelukysymykset (liite 1) valittiin puuttuvan tai vaikeasti saatavilla olevan tiedon perusteella. Kun tietoa ei löytynyt kohdemaiden viranomaisten verkkosivuilta tai materiaaleista, kyseinen tieto yritettiin saada haastattelemalla asiantuntijoita. Näihin asiantuntijoihin yritettiin olla yhteydessä sähköpostitse ja osaan myös puhelimitse. Tiedonkeruuta vaikeutti myös tässä tapauksessa se, että kohdemaissa olevat asiantuntijat eivät aina puhuneet sujuvasti englantia.

Asiantuntijat työskentelivät mm. eri maiden metrologisissa instituuteissa, biokaasuyhdistyksissä ja biokaasutuotannossa mukana olevissa yrityksissä. Haastattelu lähetettiin yhteensä 48 eri taholle, minkä lisäksi haastateltaviin henkilöihin Iso-Britanniassa, Italiassa ja Saksassa yritettiin olla yhteydessä puhelimitse. Valtaosaan näistä yhteydenotoista ei vastattu joko lainkaan, tai ilmoitettiin, että kysymyksiin ei osattu vastata.

Yhteensä kuusi henkilöä vastasi haastattelukysymyksiin, ja näistä vain kolme vastasi niihin riittävällä tarkkuudella, jotta ne voitiin ottaa mukaan analyysiin. Kolme muuta haastateltavista henkilöistä vastasivat joko vain yhteen kysymykseen, tai liian ympärilyöreästi, jotta vastauksista olisi voitu tehdä luotettavia johtopäätöksiä. Kun vastauksista ei saatu selvennettyä edes jatkokysymysten jälkeen, ne päätettiin jättää analysoimatta. Tämän tiedon lisäksi analyysiin otettiin mukaan Vaisalan aikaisemmin keräämää tietoa Ranskasta, Alankomaista, Japanista ja Yhdysvalloista. Tällä tavalla saatiin riittävä määrä tietoa analysoitavaksi, jotta analyysin pohjalta voitiin tehdä luotettavampia johtopäätöksiä.

5.2 Haastatteluaineiston analyysi

Koko haastatteluaineisto kerättiin ja tallennettiin ensin Excel-tiedostoon (liite 2). Tämän jälkeen vastauksille annettiin koodit, joiden mukaan vastaavanlaiset vastaukset järjestettiin omiin kategorioihin. Tämän jälkeen tutkimustietojen välistä yhteyttä pohdittiin, ja lopulta kerätyistä tiedoista tehtiin synteesi.

Liitteen 3 taulukossa on esitetty haastatteluvastausten koodeista tehdyt kategoriat rivillä 1. Kunkin kategorian vastaukset ovat esitetty suoraan kyseisen kategorian alapuolella. Jokaiselle vastaajalle on varattu oma rivi.

5.3 Mittausepävarmuus

Kaasun lämpöarvomittalaitteen mittausepävarmuus kuvaa mittaustulosten oletettua vaihtelua. Tässä luvussa esitettiin esimerkkejä siitä miten mittausepävarmuus voidaan määrittää eri jakaumille, sekä miten epävarmuusbudjetti voidaan rakentaa ja mitä epävarmuuskomponentteja kaasun lämpöarvoa mitatessa täytyy huomioida.

Jotta mittausepävarmuus voidaan määrittää mahdollisimman tarkasti, täytyy ensin tietää mitä jakaumaa mittaussarjan analysoimiseen kannattaa käyttää. Kun epävarmuudesta ei ole konkreettista tietoa, joudutaan jakaumafunktio usein arvioimaan. Tässä tapauksessa suorakaiteen muotoinen jakauma ja kolmionmuotoinen jakauma ovat yleisesti käytettyjä vaihtoehtoja.

Tässä tapauksessa käytetään OIML R140 -dokumentaation kalibrintikaasua esimerkkinä. Kaasun lämpöarvo on $44,729 \text{ MJ}/\text{m}^3$ [21, s.102]. Jos oletetaan, että mittalaitteella on B-typin tarkkuusluokka, se tarkoittaa käytännössä enimmillään 1 %:n epävarmuutta lämpöarvon mittauksessa, jolloin mittaustarkkuudeksi saadaan:

$$44,729 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3} \cdot 0,01 = \pm 0,44729 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}.$$

Standardiepävarmuus suorakaiteen muotoiselle jakaumalle voidaan tämän jälkeen laskea kaavalla (11):

$$u_i = \frac{0,44729}{\sqrt{3}} = 0,258 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}.$$

Kolmionmuotoisen jakauman standardiepävarmuus voidaan puolestaan laskea kaavalla (17):

$$u_i = \frac{0,44729}{\sqrt{6}} = 0,183 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}.$$

Tässä tapauksessa ei ole tiedossa kumpi jakauma on oikea, joten on suositeltavaa valita jakauma, jolla epävarmuuden aliarvioinnin todennäköisyys on pienempi. Yllä mainitussa esimerkissä suorakaiteen muotoisen jakauman standardiepävarmuus on korkeampi kuin kolmion muotoisen jakauman standardiepävarmuus. Tässä tapauksessa on siis suositeltavaa käyttää suorakaiteen muotoista jakaumaa. Tämä johtuu siitä, että mittausinstrumentin antamat arvot eivät koskaan ole absoluuttisen tarkkoja arvoja, vaan ne joudutaan aina pyöristämään. Kun jakauman muodosta tunnetaan vain ala- ja yläraja eikä siitä ole tarkempaa tietoa, on turvallisempaa olettaa kaikkien rajojen välisten arvojen olevan yhtä todennäköisiä, eli suorakaiteen mukaista jakaumaa. Kolmionmuotoisen jakauman käyttö puolestaan edellyttäisi, että keskiarvoa lähimmät arvot ovat todennäköisempiä.

Kun on määritetty, mitä jakaumaa tullaan käyttämään, voidaan epävarmuusbudjettia alkaa rakentamaan esimerkin (liite 4) mukaan. Ensin tunnistetaan relevantit epävarmuuslähteet ja määritetään niiden epävarmuudet. Tämän jälkeen ratkaistaan u_i , jakamalla epävarmuudet painotuskertoimella.

Pitkän aikavälin stabiilius, lämpötilariippuvuus, paineriippuvuus ja virtausnopeusriippuvuus kaasun lämpöarvomittalaitteelle vaikutustestin aikana, saatiin luettua suoraan OIML R140 -dokumentin spesifikaatioista. Niiden mukaan suurin sallittu virhe pitkän aikavälin stabiilisuudelle on 0,132 % [21, s. 81]. Lämpötilariippuvuudessa ja paineriippuvuudessa saa taas olla korkeintaan 0,5 %:n virhe. Suurin sallittu virhe virtausnopeusriippuvuudelle on puolestaan 0,33 %. [21, s. 75-76.]

OIML R140 -dokumentaation mukaan kalibrointikaasun epävarmuustekijöitä määrittäessä jokaisen kaasukomponentin pitoisuuden suhteellisen poikkeaman on oltava alle 5 % suhteessa tyyppihyväksynnässä annettuihin nimellisarvoihin lopullisessa seoksessa. Kalibrointikaasun lämpöarvon poikkeaman täytyy puolestaan olla alle 1 %. [21, s. 100.]

OIML:n esimerkin mukaan sertifioitujen kalibrointikaasujen epävarmuustekijät voidaan määrittää seuraavalla tavalla: metaani: 0,2 %:n suhteellinen

epävarmuus; etaani, propaani, 2-metyylipropaani, n-butaani, tyyppi: 1 %:n suhteellinen epävarmuus; kaikki muut komponentit: 2 %:n suhteellinen epävarmuus. Tämän jälkeen voidaan käyttää OIML:n listaamaa kalibrointikaasupitoisuutta ($N_2 = 0,40$, $CO_2 = 1,80$, $CH_4 = 84,00$, $C_2H_6 = 9,4$, $C_3H_8 = 3,40$, $C_4H_{10} = 1,00$) epävarmuustekijöiden määrittämiseen: $0,40 \cdot 0,01 + 1,80 \cdot 0,02 + 84,00 \cdot 0,002 + 9,4 \cdot 0,01 + 3,4 \cdot 0,01 + 1 \cdot 0,01 = 0,346$. [21, s.100-102]

Taulukko 2: Mittausepävarmuuden määrittäminen epävarmuusbudjetin avulla.

1	2	3	4	5	6
Epävarmuustekijä	Arvoalue	Standardi epävarmuus	Arvioinnin tyyppi	Herkkyyskerroin	Vaikutus yhdistettyyn standardiepävarmuuteen
Pitkän aikavälin stabiilius	0,132	0,5774	B	1	0,0762
Lämpötilariippuvuus	0,5	0,5774	B	1	0,2887
Paineriippuvuus	0,5	0,5774	B	1	0,2887
Virtausnopeusriippuvuus	0,33	0,5774	B	1	0,1905
Kalibrointi-kaasun pitoisuuden epävarmuus	0,346	0,5774	B	1	0,1998

Vaikutus yhdistettyyn standardiepävarmuuteen laskettiin kertomalla arvoalue standardiepävarmuuden ($\frac{1}{\sqrt{3}} = 0,5774$) kanssa. Yhdistetty standardiepävarmuus lasketaan tämän jälkeen Liitteessä 1 mainitun esimerkin mukaisesti:

$$u(y) = \sqrt{0,0762^2 + 0,2887^2 + 0,2887^2 + 0,1905^2 + 0,1998^2} = 0,498 \%$$

Laajennettu epävarmuus $U(y)$ saadaan puolestaan laskettua kertaamalla yhdistetty standardiepävarmuus otoskeskihajonnan arvolla $s = 1,96$:

$$U(y) = s \cdot u(y) = 1,96 \cdot 0,498 = 0,977 \approx 0,98 \%$$

Mittalaitteen mittausepävarmuus jää siis alle yhden prosentin, eli se täyttää OIML:n B-luokan mittalaitteelle määrittämät tarkkuusvaatimukset. Täytyy myös huomioida, että epävarmuusbudjetissa käytetyt arvot ovat OIML-dokumentaatioissa mainitut suurimmat sallitut virheet. Todellisessa tilanteessa osa epävarmuustekijöistä olisi varmasti huomattavasti pienempiä kuin taulukossa 2 listatut arvot. Tässä tapauksessa epävarmuuskomponenttien tarkempia arvoja ei kuitenkaan ollut tiedossa. Mittalaitteen kehitystyössä tällaista skenaarioita voidaan kuitenkin käyttää hyväksi siten, että niiden avulla saadaan jokaiselle epävarmuustekijälle määritettyä sen suurin sallittu lukuarvo.

6 Tulokset

Tässä luvussa käydään läpi kohdemaiden kaasuverkkojen laatuvaatimukset biometaanille, haastatteluaineiston analyysin pohjalta tehdyt johtopäätökset, sekä mittausepävarmuuden pienentämisestä syntyvä lisäarvo. Tämän lisäksi esitellään arvio siitä, kuinka paljon lisäarvoa kaasun laadun tai mittaustarkkuuden parantamisesta syntyy.

6.1 Kaasuverkkojen laatuvaatimukset biometaanille

Kaasuverkkojen laatuvaatimukset biometaanille sekä biokaasumittalaitteilta vaadittavat sertifiointit tai viranomaishyväksynät ovat maakohtaisia. Kaasun puhtauden mittaaminen on tärkeää koska sen avulla voidaan vahvistaa, että kaasu täyttää maakohtaiset laatuvaatimukset. Biometaanin laadun mittaaminen on myös tärkeää sen takia, että sen laatu määrittää siitä saadun hinnan.

Tietyissä maissa, kuten esimerkiksi Kanadassa on maan sisäisiä alueellisia eroja kaasuverkkojen laatuvaatimuksissa. Tässä työssä ei olla esitetty eri

maiden alueellisia vaatimuksia yksitellen. Sen sijaan on listattu jokaiselle mittayksikölle asetettu minimi- ja maksimivaatimus maanlaajuisesti.

Taulukossa 3 esitetään kaasuverkkojen maakohtaiset laatuvaatimukset biometaanille. Mittaussuureet ovat taulukon sarakkeessa 1 ja niiden yksiköt sarakkeessa 2. Samat mittaussuureet on lisätty taulukkoon useampaan kertaan, kun eri maat ovat käyttäneet samalle mittaussuureelle eri yksikköä. Kohdemaiden asettamat vaatimukset eri mittaussuureille ovat puolestaan sarakkeissa 3–10.

Taulukko 3: Kaasuverkkojen laatuvaatimukset. [34; 35; 36; 37; 38; 39]

	Yksikkö	USA	Kanada	Japani	Saksa	UK	Ranska	Italia	Espanja
Lämpöarvo	BTU/ft ³	940 – 1100	> 966						
Lämpöarvo	MJ/m ³			~45				34,95 – 45,28	
Lämpöarvo	kWh/m ³				≥ 10,51		10,7 – 12,8		
Wobbe indeksi	MJ/m ³					47,20 – 51,41		47,31 – 52,33	
Wobbe indeksi	kWh/m ³				13,6 – 15,7		13,64 – 15,70		
CH ₄	mol %								≥ 90
CH ₄	vol %			~98	> 95				
CO ₂	mol %	≤ 2						≤ 2,5	
CO ₂	vol %		< 2		< 5				
CO ₂	%			~2			< 2		
CO	mol %							~ 0,1	≤ 2
O ₂	mol %	≤ 0,4	< 0,4			≤ 0,2		≤ 0,6	
O ₂	vol %				0,5 – 3				

O ₂	ppm						< 100		
H ₂	mol %					≤ 0,1		~ 0,5	≤ 5
H ₂	vol %				< 1				
H ₂	%						< 6		
H ₂ O	lbs/mmSft ³	≤ 7							
H ₂ O	mg/m ³				200 (≤ 10 bar) 50 (> 10 bar)				
Si	ppm	≤ 1						~ 5	
Si	mg/m ³				< 5				
N ₂	vol %		< 3						
N ₂	mol %								
NH ₃	mg/m ³						< 3	~ 3	
Hg	μg/m ³						< 1	~ 1	
F	mg/m ³						< 10	~ 3	
Cl	mg/m ³						< 1	~ 1	
H ₂ S	gr./100 ft ³	≤ 1/4							
H ₂ S	mg/m ³				< 5	≤ 5		≤ 5	
H ₂ S	ppm						< 5		
CH ₃ SH	mg/m ³				< 6			≤ 6	

(CH ₃) ₂ S	mg/m ³								
S	gr./100 ft ³	≤ 1							
S	mg/m ³				< 30	≤ 50	< 30	≤ 20	
S	ppm								
Inertit	mol %	≤ 5	< 4						
Lämpötila	°F	50 – 120							
Lämpötila	°C						5 – 35		
Hiilivetyjen kastepiste	°F	–40							
Hiilivetyjen kastepiste	°C				–2				
Veden kastepiste	°C						< –5		
Tuhka ja pienhiukkaset		0							
Biologiset sivutuotteet		0							
Ammoniakki ja amiinit					0				
Raskasmetallit		0							

6.2 Kaasun laadun ja mittaustarkkuuden parantamisen kannattavuus

Kaasun mittaustarkkuuden parantamisesta tuli ristiriitaista tietoa. Osa vastaajista olivat sitä mieltä, että kaasun mittaustarkkuus on jo nykyinstrumenteilla riittävän hyvä, kun puolestaan toiset halusivat edelleen, että laitteiden mittaustarkkuutta parannettaisiin. Nykyinstrumenttien mittaustarkkuus vaikuttaa jo olevan riittävän hyvä täyttääkseen eri maiden kaasuverkkojen laatuvaatimukset. Tiettyjen kaasupitoisuuksien (erityisesti CO_2 ja CH_4) mittaustarkkuuden parantamiselle näyttää kuitenkin edelleen olevan kysyntää.

Haastatteluiden perusteella on myös epäselvää, onko kaasun laadun parantaminen taloudellisesti kannattavaa. Kaasun laadun katsottiin olevan riittävän hyvä sen täyttäessä kaasuverkkojen maakohtaiset laatuvaatimukset. Toisaalta kaasupitoisuuksien tarkemmalle mittaukselle löytyy kysyntää, ja kaasupitoisuuksien tarkempi mittaaminen vaikuttaa myös kaasun lämpöarvon mittaustarkkuuteen. Haastatteluista ei kuitenkaan tullut selvästi esille, että erityisesti kaasun lämpöarvon tarkempi mittaaminen olisi tarpeen. Halvemmillä ja kompaktimmeille mittalaitteille näyttää kuitenkin olevan kysyntää.

6.3 Mittausepävarmuuden pienentämisestä syntyvä taloudellinen hyöty

Biometaanin arvo määräytyy kertomalla kaasun lämpöarvo sen tilavuudella. Mittausepävarmuuden pienentämisestä saatava rahallinen hyöty on siis täysin lämpöarvosta riippuvainen. Jos kaasun ostaja vähentää mittalaitteen mittausepävarmuuden $u(y)$ kokoisen osuuden kaasun ostohinnasta seuraavalla tavalla:

$$Hinta_{lopullinen} = Hinta_{biometaani} - Hinta_{biometaani} \cdot u(y),$$

on selvää, että mittausepävarmuuden pienentämisestä tulisi rahallista hyötyä myyjälle. Tässä tapauksessa puolittamalla mittausepävarmuus esimerkiksi $1\% \rightarrow 0,5\%$, saataisiin myös kaasun ostohintaa nostettua $0,5\%$. Jos kaasun

ostaja puolestaan ei vähennä mittausepävarmuuden kokoista osuutta kaasun ostohinnasta, vaan luottaa täysin mittalaitteen näyttämään mitta-arvoon, niin mittausepävarmuuden pienentäminen tuskin vaikuttaa kaasun lopulliseen hintaan merkittävästi. Pienentämällä mittausepävarmuutta voidaan kuitenkin vähentää riskiä, että biometaanin ostaja maksaa kaasusta liikaa ja parantaa mahdollisuutta, että kaasun myyjä saa tuottamastaan polttoaineesta reilun hinnan.

6.4 Mittalaitteelta vaadittava sertifiointi tai muu viranomaishyväksyntä

Biokaasun lämpöarvomittalaitteilta vaaditut sertifikaatit ovat maakohtaisia, mutta eri maiden mittalaitteille asettamat vaatimukset ovat usein hyvin samantyyppiset. Esimerkiksi Saksassa kaasun lämpöarvomittalaitteet vaativat PTB:n myöntämän tyyppihyväksyntätodistuksen, kun puolestaan Alankomaissa mittalaitteelle tarvitaan NMI-sertifikaatti. Saksan PTB:n tyyppihyväksyntätodistus vaatii 0,8 %:n mittaustarkkuuden kaikille energiakaasuille. Alankomaiden NMI-sertifikaatti puolestaan vaatii OIML R140:n asettaman mittaustarkkuuden, jonka mukaan A-luokan mittalaite vaatii 0,5 %:n mittaustarkkuuden, B-luokan mittalaite 1,0 %:n mittaustarkkuuden ja C-luokan mittalaite 1,5 %:n mittaustarkkuuden.

PTB:n myöntämä tyyppihyväksyntätodistus on pakollinen Saksassa käytettäville mittalaitteille. Vaikka mittalaitteelle olisi jo hankittu toisesta maasta sertifikaatti, joka kattaa samat vaatimukset, täytyy maakohtainen sertifiointi tehdä siitä huolimatta. Tämä pidentää toimitusaikaa ja tuottaa lisäkustannuksia. Kaikissa maissa sertifiointivaatimukset eivät onneksi ole yhtä tiukat. Esimerkiksi Alankomaissa riittää, jos mittalaite on sertifioitu toisessa maassa, niin kauan kuin mittalaite täyttää OIML R140:n asettamat vaatimukset.

Jos mittalaitteelle haetaan PTB:n tyyppihyväksyntätodistus, se täyttää ainakin OIML R140:n B-luokan mittalaitteen tarkkuusvaatimuksen. Tässä tapauksessa laitetta ei välttämättä tarvitse sertifioida uudestaan Alankomaissa, jos PTB:n asettama mittaustarkkuus on riittävä haluttuun käyttötarkoitukseen. Pakolliset

maakohtaiset sertifikaatit hankaloittavat kuitenkin tilannetta huomattavasti, ja maakohtaisia sertifiointivaatimuksia täytyy vielä selvittää lisää.

Haastatteluista kävi myös ilmi, että biokaasun lämpöarvomittalaitteille usein on asetettu muitakin kansainvälisiä tai alueellisia vaatimuksia. Näitä ovat mm. ATEX, CML, TIIS, UKEX ja MET mark. CE-merkintä ATEX on tarkoitettu räjähdysturvallisissa tiloissa käytettäville laitteille, suojajärjestelmille ja komponenteille, joiden on täytettävä ATEX-direktiivin tuotevaatimukset Euroopassa [40]. Japanissa räjähdysturvallisissa tiloissa käytettäville laitteille vaaditaan TIIS- tai CML-sertifikaatti. [41; 42]. Iso-Britanniassa vaaditaan Brexitin jälkeen UKEX-hyväksyntä ja Yhdysvalloissa MET mark merkintä räjähdysturvallisissa tiloissa käytettäville kaasun lämpöarvomittalaitteille [43].

7 Yhteenveto

Tässä opinnäytetyössä käsiteltiin eri maiden kaasuverkkojen laatuvaatimuksia biometaanille, sekä kaasun lämpöarvomittalaitteiden sertifiointi- ja viranomaisvaatimuksia kyseisissä maissa. Tämän lisäksi tutkittiin kuinka paljon rahallista hyötyä kaasun laadun ja mittaustarkkuuden parantaminen toisi.

Eri maiden kaasuverkkojen laatuvaatimukset poikkeavat huomattavasti toisistaan. Esimerkiksi Yhdysvaltojen, Saksan, Italian ja Ranskan kaasuverkkojen laatuvaatimukset ovat melko tiukat, kun puolestaan Espanjan, Kanadan, Iso-Britannian ja Japanin laatuvaatimukset eivät näytä olevan yhtä tiukat. Japanin kaasuverkkojen laatuvaatimuksista oli tosin vaikeata löytää tietoa, eli Taulukon 3 laatuvaatimuksissa saattaa vielä olla puutteita.

Myös eri maiden sertifiointivaatimukset poikkeavat toisistaan. Saksassa käytettäville kaasun lämpöarvomittalaitteille täytyy esimerkiksi aina hakea PTB:n tyyppi hyväksyntätodistus, kun puolestaan Alankomaissa riittää, jos mittalaite on sertifioitu toisessa maassa ja mittalaite täyttää OIML:n asettamat vaatimukset. Tässä työssä ei kuitenkaan saatu selvitettyä kaikkien kohdemaiden sertifiointivaatimuksia, eli näitä olisi vielä hyvä tutkia enemmän.

Kaasun lämpöarvomittalaitteiden mittaustarkkuuden parantamisesta tuli ristiriitaista tietoa. Vastaajien mukaan lämpöarvon tarkemmalle mittaamiselle ei ole tarvetta, mutta useat vastaajat kuitenkin toivoivat yksittäisten kaasujen mittaustarkkuuden parantamista. Kaasupitoisuuden tarkempi mittaaminen mahdollistaisi kuitenkin myös lämpöarvon tarkemman mittaamisen, eli jäi epäselväksi miksi yksittäisten kaasukomponenttien tarkempi mittaaminen oli tärkeää, mutta kaasun lämpöarvon tarkempi mittaaminen ei. Kaasun puhtauden parantaminen ei vastaajien mukaan myöskään ollut tarpeellista, vaikka kaasun laadun parantaminen vaikuttaakin positiivisesti sen hintaan. Mittalaitteet vaikuttavat myös olevan melko kalliita, joten halvempien mittausratkaisujen kehittäminen voisi mahdollisesti olla kannattavaa. Halvemmalle ja kompaktimmalle mittalaitteelle löytyy nimittäin kysyntää.

Lähteet

- 1 Observations for a better world. 2022. Verkkoaineisto. Vaisala. <<https://www.vaisala.com/fi/vaisala-company/vaisala-brief>>. Luettu 11.1.2022.
- 2 Kelavuori, Janne. 2017. Biometaanin tuotanto ja käyttö Suomessa.
- 3 The outlook for biogas and biomethane to 2040. 2020. Verkkoaineisto. International Energy Agency. <<https://www.iea.org/reports/outlook-for-biogas-and-biomethane-prospects-for-organic-growth/the-outlook-for-biogas-and-biomethane-to-2040>> Luettu 11.7.2022.
- 4 An introduction to biogas and biomethane. Verkkoaineisto. International Energy Agency. <<https://www.iea.org/reports/outlook-for-biogas-and-biomethane-prospects-for-organic-growth/an-introduction-to-biogas-and-biomethane>> Luettu 18.8.2022.
- 5 How Biomethane is Produced. 2019. Verkkoaineisto. Biomethane. <<https://www.biomethane.org.uk/how-biomethane-is-produced.html>>. Luettu 13.1.2022.
- 6 Biopolttoaineita, bionesteitä ja biomassapolttoaineita koskeva toiminnanharjoittajan kestävyyskriteeriohje. 2022. Verkkoaineisto. Energiavirasto. <<https://energiavirasto.fi/documents/11120570/12778928/OHJE-Toiminnanharjoittajan-kest%C3%A4vyyskriteeriohje.pdf/6eafa3a2-4c7e-adea-c955-4959a54a8b6d/OHJE-Toiminnanharjoittajan-kest%C3%A4vyyskriteeriohje.pdf?t=1644837262107>> Luettu 12.7.2022.
- 7 Biogas Analysis and gas Quality Monitoring of Anaerobic Digestion Processes. 2021. Verkkoaineisto. Anaerobic Digestion Community. <<https://anaerobic-digestion.com/biogas-analysis/>> Luettu 6.5.2022.
- 8 Metaanin ja hiilidioksidin monikaasumittapää MGP262. Verkkoaineisto. Vaisala. <<https://www.vaisala.com/fi/products/instruments-sensors-and-other-measurement-devices/instruments-industrial-measurements/biogas-monitoring/mgp262>>. Luettu 16.1.2022.
- 9 Biokaasua! Käsikirja kaasukäyttöisten ajoneuvojen hankinnan ja käytön tueksi. 2020. Verkkoaineisto. <<https://smartchemistrypark.turkubusinessregion.com/wp-content/uploads/2021/02/Biokaasua-kasikirja.pdf>> Luettu 17.8.2022.

- 10 Kemian metrologian opas. 2005. Verkkoaineisto. Mittatekniikan keskus. <<https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/MIKES/2005-J6.pdf>> Luettu 6.5.2022.
- 11 Todennäköisyyslaskennan peruskäsitteet. 2000. Verkkoaineisto. M niin kuin matematiikka. <<https://matta.hut.fi/matta2/isom/html/todnakl1.html>>. Luettu 19.1.2022.
- 12 Random Variables. Verkkoaineisto. Yale University. <<http://www.stat.yale.edu/Courses/1997-98/101/ranvar.htm>> Luettu 20.1.2022.
- 13 Mittaustulosten käsittely. Verkkoaineisto. Aalto yliopisto. <https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/884085/mod_folder/content/0/AloitusMatsku.pdf> Luettu 7.5.2022.
- 14 7 Steps to Calculate Measurement Uncertainty. 2020. Verkkoaineisto. Isobudgets. <<https://www.isobudgets.com/7-steps-to-calculate-measurement-uncertainty/>> Luettu 24.8.2022.
- 15 a Dupuis, Francois. Laurencelle, Louis. 2002. Statistical Tables, Explained And Applied. World Scientific Publishing Company.
- 16 Nelson, Peter R. & Copelands, Karen A. F. & Coffin, Marie. 2003. Introductory Statistics for Engineering Experimentation. 1st edition. Elsevier Science & Technology.
- 17 Probability Distributions for Measurement Uncertainty. Verkkoaineisto. Isobudgets. <<https://www.isobudgets.com/probability-distributions-for-measurement-uncertainty/>> Luettu 23.5.2022.
- 18 Ayyub, Bilal M. & McCuen, Richard H. 2011. Probability, Statistics, and Reliability for Engineers and Scientists. 3rd edition. Taylor & Francis Group.
- 19 SFS 3700. Metrologia. Perus- ja yleisterminen sanasto. 3. 1998. Suomen Standardisoimisliitto.
- 20 Göbel, Ernst O. & Siegner, Uwe. 2015. Quantum Metrology: Foundation of Units and Measurements. 1st edition. John Wiley & Sons, Incorporated.
- 21 OIML R140. 2007. Verkkoaineisto. International Organization of Legal Metrology. <https://www.oiml.org/en/files/pdf_r/r140-e07.pdf> Luettu 20.7.2022.
- 22 Pfeifer, Tilo. 2002. Production Metrology. Walter de Gruyter GmbH.

- 23 Uncertainty Budget Example. 2012. Verkkoaineisto. Isobudgets. <<https://www.isobudgets.com/uncertainty-budget-example/>> Luettu 31.1.2022.
- 24 Slaev, Valery A. & Chunovkina, Anna G. & Mironovsky, Leonid A. 2013. Metrology and Theory of Measurement. Hubert & Co. GmbH & Co. KG, Göttingen.
- 25 de Bont, Cees. 2007. Market Research Handbook. 5th edition. John Wiley & Sons, Incorporated.
- 26 Bax, Steve. 2013. Cambridge Marketing Handbook. 1st edition. Kogan Page.
- 27 Saldana, Johnny. 2011. Fundamentals of Qualitative Research. Oxford University Press Incorporated.
- 28 Martin, William E. & Bridgmon, Krista D. 2012. Quantitative and Statistical Research Methods: From Hypothesis to Results. 1st edition. John Wiley & Sons, Incorporated.
- 29 Jason, Leonard A. & Glenwick, David S. 2016. Handbook of Methodological Approaches to Community-Based Research: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods. Oxford University Press, Incorporated.
- 30 Moore, Nick. 2013. How to Do Research - The Practical Guide to Designing and Managing Research Projects. 3rd edition. Facet Publishing.
- 31 Vogt, W. Paul & Gardner, Dianne C. & Haeffele, Lynne M. 2012. When to Use What Research Design. Guilford Publications.
- 32 Grover, Rajiv & Vriens, Marco. 2006. The Handbook of Marketing Research: Uses, Misuses and Future Advances. 1st edition. SAGE Publications.
- 33 Galletta, Anne. 2013. Mastering the Semi-Structured Interview and Beyond: From Research Design to Analysis and Publication. New York University Press.
- 34 Renewable Natural Gas Quality Specifications in North America. 2019. Verkkoaineisto. Biogas World. <<https://www.biogasworld.com/news/renewable-natural-gas-quality-specifications-in-north-america/>> Luettu 6.1.2022.
- 35 Technische Mindestanforderungen zur Einspeisung von Biogas. 2016. Verkkoaineisto. MVV Netze. <<https://www.mvv->

netze.de/fileadmin/user_upload_mv-netze/Dokumente/energie_erzeugen/biogasanlage/technische-mindestanforderungen-biogas.pdf> Luettu 7.1.2022.

- 36 Biomethane into the Gas Network: A Guide for Producers. 2009. Verkkoaineisto. Department of Energy & Climate Change. <<https://www.biogas-info.co.uk/latest-news/decc-publish-biomethane-into-the-gas-network-a-guide-for-producers/>> Luettu 15.2.2022.
- 37 Contrat Relatif A L´injection de Biomethane Dan Le Reseau De Distribution De Gaz. 2018. Verkkoaineisto. Gaz Réseau Distribution France. <https://www.gedia-reseaux.com/wp-content/uploads/2021/11/Contrat_dinjection_biomethane_Conditions-Generales.pdf> Luettu 15.1.2022.
- 38 Allegato 11A: Requisiti di qualità del gas. 2018. Verkkoaineisto. Sezione Erogazione del Servizio di Trasporto. <https://www.retragas.it/home/cms/retragas/codice_di_rete/doc_2013/CA_P_11A.pdf> Luettu 10.1.2022.
- 39 Otras Disposiciones. 2018. Verkkoaineisto. Ministerio Para la Transición Ecológica. <<https://www.boe.es/boe/dias/2018/10/23/pdfs/BOE-A-2018-14557.pdf>> Luettu 12.1.2022.
- 40 ATEX and explosive atmospheres. Health and Safety Executive. Verkkoaineisto. < <https://www.hse.gov.uk/fireandexplosion/atex.htm>> Luettu 26.7.2022.
- 41 About TIIS. 2014. Technology Institute of Industrial Safety. Verkkoaineisto. <https://www.tiis.or.jp/09_03_subcategory/> Luettu 26.7.2022.
- 42 The Certified Master Logistician Program. The International Society of Logistics. Verkkoaineisto. <<http://www.sole.org/cml.asp>> Luettu 27.7.2022.
- 43 Eurofins MET Mark. 2022. Eurofins. Verkkoaineisto. <<https://www.eurofins.com/electrical-and-electronics/about-us/certifications/eurofins-met-mark> > Luettu 27.7.2022.

Haastattelukysymykset

- 1. In your experience, is there a demand for higher measuring accuracy for calorific value of renewable natural gas?**
- 2. How much do you believe improving the measuring accuracy for renewable natural gas by X percent would be worth to a customer?**
- 3. In your experience, is there a demand for higher quality renewable natural gas? What is the main gas quality parameter that needs to be improved: Calorific value, water dew point, CO₂ content, other impurities (please specify)?**
- 4. How much do you believe improving the calorific value of renewable natural gas by X percent would be worth to a customer?**
- 5. Do calorific value measuring devices need to be certified in <country>? If yes, then what kind of accuracy is required for the measuring devices? Is there a specific type of certificate such as OIML R140 that is needed? Is the certification scheme national, or do you accept certificates issued by a test institute in another country, such as NMI Certification in the Netherlands?**

Haastatteluvastausten analyysi

Koodi	Kategoria	Vastaukset (koodojen numerot merkitty vastausten perään)								
1. Mittaustarkkuuden parantamisen tarve	Asiakkaan tarve	Lämpöarvon määrittämiseen tarvitaan helpempi menetelmä. (3)	Jos oikauskaus ja vedyn sekoitusta käytetään tulevaisuudessa, niiden tarkasta mittauksesta tulee haastavaa. (1)	Häivempi hinta ja kompaktimpi laite on korkein prioriteetti. (2, 3)	Vakauden parantaminen on tärkeintä. (2)	Parempi CO2-N2 suhteen hallinta on prioriteetti ja tarkka CO2 mittaus. (1)	Mittaustarkkuuden parantaminen on tärkeintä. (1)	Laiteen hinta ja mittaustarkkuuden parantaminen on tärkeintä. (1, 3)		
2. Muu laitteen kehittämisen hinta-laatusuhde		Mittaustarkkuuden parantamisesta saatava taloudellinen hyöty	En usko että se tuo lisäarvoa, koska Sakkan jos kaasu täyttää viranomaisvaatimukset, laatuparametreja ei tarvitse parantaa. (6)	Biometaanin syöttävät yritykset täyttävät jo verkonomistajien vaatimukset. (5)	Se riippuu läysin siitä, jos tarkkojen mittausten avulla voidaan säästää rahaa. (4)	Euroopassa biometaanin laatu säädelään EN 16723 standardissa. Biokaasu jalo... (6, 7)	Euroopassa kaasun laatu on määritetty CEN-standardein mukaisesti. Tästä lisäksi... (6, 7)			
3. Mittaustarkkuuden vaikutus hintaan	Mittaustarkkuuden parantamisesta saatava taloudellinen hyöty	Kaasun laadun parantamisesta saatava taloudellinen hyöty	Kaasun eno-näytystyö kertomalla kaasun lämpöarvo sen tilavuudella. (8, 9)	Se riippuu läysin siitä, jos tarkkojen mittausten avulla voidaan säästää rahaa. (4)	Euroopassa kaasun laatu on määritetty CEN-standardein mukaisesti. Tästä lisäksi... (6, 7)	Euroopassa kaasun laatu on määritetty CEN-standardein mukaisesti. Tästä lisäksi... (6, 7)				
4. Mittaustarkkuuden vaikutus hintaan		Lämpöarvon parantamisesta syntyvä lisäarvo asiakkaalle	Lämpöarvon parantamisesta syntyvä lisäarvo asiakkaalle	Kyllä, niiden on täytettävä OIM6 R140:n vaatimukset. (10)	ATEX (10)	Esimerkiksi CML tai T10. (10)	ATEX (10)	ATEX (10)	MET mark on ok. (10)	
5. Kaasuerkkeiden vaatimukset	Mittaustarkkuuden parantamisesta saatava taloudellinen hyöty	Kaasun laadun parantamisesta saatava taloudellinen hyöty	Energiaa saadulta vaadittu mittaustarkkuus on 0,8%. (12)	CH4: ~98%, CO2: ~2% (12, 13)	CV: ~10, 7 kWh/nm3 (14)	CO2: 0,2-0,3% tarkkuudella, toive on 0,1% (13)	CH4: 70-100%, CO2: 0-10% (12, 13)	CH4: 90-100% (0,5% tarkkuus), CO2: 0-10% (0,2% tarkkuus) (12, 13)	CH4: ~70-100% (12)	CH4: ~90-100% (12)
6. Biokaasun laatu		Sertifiointi	Sertifiointi tai muut viranomaismääräykset	CH4: 90-100%, CO2: 0-10%, CV: ~65 MJ/m3 (11)	CH4: 90-100%, CO2: 0-10%, CV: ~65 MJ/m3 (11)					
7. Biometaanin laatu	Mittaustarkkuuden parantamisesta saatava taloudellinen hyöty	Kaasun laadun parantamisesta saatava taloudellinen hyöty								
8. Lämpöarvon parantaminen		Lämpöarvon parantamisesta syntyvä lisäarvo asiakkaalle	Lämpöarvon parantamisesta syntyvä lisäarvo asiakkaalle							
9. Vaikutus kaasun hintaan	Mittaustarkkuuden parantamisesta saatava taloudellinen hyöty	Kaasun laadun parantamisesta saatava taloudellinen hyöty								
10. Sertifiointi		Sertifiointi	Sertifiointi tai muut viranomaismääräykset							
11. Viranomaismääräykset	Mittaustarkkuuden parantamisesta saatava taloudellinen hyöty	Kaasun laadun parantamisesta saatava taloudellinen hyöty								
12. CH4 mittaustarkkuus		Vaadittu mittaustarkkuus	Vaadittu mittaustarkkuus							
13. CO2 mittaustarkkuus	Mittaustarkkuuden parantamisesta saatava taloudellinen hyöty	Kaasun laadun parantamisesta saatava taloudellinen hyöty								
14. CV mittaustarkkuus		Vaadittu mittaustarkkuus	Vaadittu mittaustarkkuus							

Kategorisoidut haastatteluvastaukset

Asiakkaan tarve	Mittaustarkkuuden parantamisesta saatava taloudellinen hyöty	Kaasun laadun parantamisesta saatava taloudellinen hyöty	Lämpöarvon parantamisesta syntyvä lisäarvo asiakkaalle	Sertifiointi tai muut viranomaismääräykset	Vaadittu mittaustarkkuus
	En usko, että se tuo lisäarvoa, koska Saksan lain sääntelemä tarkkuusvaatimus riittää yleensä kaikentyyppisille kaasuille.	Jos kaasu täyttää viranomaisvaatimukset, laatu-parametreja ei tarvitse parantaa.	Maakaasun arvo määräytyy kertomalla kaasun lämpöarvo sen tilavuudella.	Kyllä, se on varmennettava, jos asiakasta veloitetaan prosessissa. Se vaatii PTB:n myöntämän tyyppihyväksyntätodistuksen.	Energiakaasuilta vaadittu mittaustarkkuus on 0,8 %.
Lämpöarvon määrittämiseen tarvitaan halvempi menetelmä.	Biometaania syöttävät yritykset täyttävät jo verkonomistajien vaatimukset. Heille ei ole tarvetta parantaa tarkkuutta.	Euroopassa biometaanin laatu säädelään EN 16723 standardissa. Biokaasu jalostetaan maakaasulaatuiseksi, jolloin sen laatu on riittävän hyvä.	Mitätön.	Kyllä, niiden on täytettävä OIML R140:n vaatimukset. Muutkin sertifikaatit kelpaavat, jos myöntäjä täyttää akkreditointia ja sertifiointia koskevat vaatimukset.	

Jos maakaasun ja vedyn sekoituksia käytetään tulevaisuudessa, niiden tarkasta mittauksesta tulee haastavaa.	Se riippuu täysin siitä, jos tarkkojen mittausten avulla voidaan säästää rahaa. Silloin se on taloudellinen kysymys.	Euroopassa kaasun laatu on määritelty CEN-standardien mukaisesti. Tämän lisäksi löytyy myös maakohtaisia vaatimuksia.	Henkilökohtaisesti en näe, että se on tarpeellista. Kaasun lämpöarvo on jo tarpeeksi korkea.		
Halvempi hinta ja kompaktimpi laite on korkein prioriteetti.				ATEX	CH4: 90-100 %, CO2: 0-10 %, CV: ~45 MJ/m3
Vakauden parantaminen on tärkeintä.				Esimerkiksi CML tai TIIS.	CH4: ~98 %, CO2: ~2 %
Parempi O2:N2 suhteen hallinta on prioriteetti ja tarkka CO2 mittaus.					CV: ~10,7 kWh/Nm3
Mittaustarkkuuden parantaminen on tärkeintä.					CO2: 0,2-0,3 % tarkkuudella, toive on 0,1 %.
				ATEX	CH4: 70-100 %, CO2: 0-10 %
				ATEX	CH4: 90-100 %: (0,5 % tarkkuus), CO2: 0-10 %: (0,2 % tarkkuus)

				MET mark on ok.	CH4: ~70-100 %
Laitteen hinta ja mittaustarkkuuden parantaminen on tärkeintä.					CH4: ~90-100 %

Epävarmuusbudjetti

1	2	3	4	5	6
Syöttö- määrä	Arvoalue	Standardi epävarmuus	Arvioinnin tyyppi	Herkkyyss- kerroin	Vaikutus yhdistettyyn standardiepävarmuuteen
X_i	x_i	$u(x_i)$	$A(B)$	$c_i = \frac{\partial F}{\partial x_i}$	$u_i(y_q) = \left \frac{\partial F}{\partial x_i} \right \cdot u(x_i)$
...
					$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2(y)}$