

Joni Konnevaara

# Esiselvitys liikuteltavien soihtujen käyttömahdollisuuksista maakaasun siirtoverkostossa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Kone- ja tuotantotekniikka

Insinöörityö

25.11.2012

Tekijä(t) Otsikko  Sivumäärä Aika	Joni Konnevaara Esiselvitys liikuteltavien soihtujen käyttömahdollisuuksista maakaasuverkostossa 49 sivua + 21 liitettä 26.11.2013
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Konetekniikan koulutusohjelma
Suuntautumisvaihtoehto	Ympäristö- ja energiatekniikka
Ohjaaja(t)	Ympäristö- ja turvallisuuspäällikkö Aki Huomo, Gasum Oy Lehtori Jarmo Perttula
<p>Tämän insinööriyön tavoitteena oli laatia esiselvitys Gasum Oy:lle liikuteltavien soihtujen käytöstä maakaasuverkostossa sekä esittää vaihtoehtoja maakaasun soihdutukselle. Esiselvityksessä käsitellään liikuteltavien soihtujen hintatasoa, tekniikkaa ja käytettävyyttä siirtoputkiston painetason ollessa 54 bara:a.</p> <p>Työn alussa tutustutaan ilmastoon, kasvihuonekaasuihin ja ilmastopimuksiin. Niiden avulla voidaan ymmärtää metaanin ja hiilidioksidin vaikutuksia ilmakehään maakaasuputken huoltotoimenpiteiden aikana. Työssä perehdytään kaasun virtaukseen putkessa teorian ja yhtälöiden avulla. Tämän avulla voidaan laskennallisesti havainnollistaa maakaasuputken tyhjennykseen liittyviä haasteita. Esiselvityksessä on käyty läpi maakaasuverkoston jaottelua, soihdutusta ja vaihtoehtoisia tyhjennysmenetelmiä.</p> <p>Työn laskennallisessa osuudessa saatiin selville kaasun virtausnopeuden kasvavan korkeaksi ja lämpötilan laskevan kymmeniin pakkasasteisiin. Lisäksi huomattiin putken tyhjennykseen kuluvan ajan olevan yli vuorokausi. Tämän seurauksena liikuteltavien soihtujen käyttö maakaasuverkostossa osoittautuu haasteelliseksi, sillä soihtuun tarvittavat apujärjestelmät nostavat soihdun hinnan korkeaksi.</p>	
Avainsanat	maakaasu, soihtu, soihdutus

Author(s) Title Number of Pages Date	Joni Konnevaara Preliminary Research on Possibilities of Mobile Flare Usage in Natural Gas Network 49 pages + 21 appendices 26 November 2013
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Mechanical Engineering
Specialisation option	Energy and Environmental Engineering
Instructor(s)	Aki Huomo, Environmental and Security Manager Jarmo Pettula, Senior Lecturer
<p>The goal for this Bachelor's thesis was to make a preliminary research for Gasum Oy concerning the usage of mobile flaring systems in a natural gas grid and to present alternatives for natural gas flaring. The preliminary research addresses the prices, techniques and usability of mobile flaring systems when the pressure level in the transfer pipeline system is 54 bars.</p> <p>The beginning of the thesis presents the basics of climate, greenhouse gases and climate agreements. This provides a basis for understanding the climate effects of methane and carbon dioxide during the maintenance work of the gas pipes. The thesis examines gas flow theories and equations which demonstrate the challenges when dealing with the emptying of the gas pipes. It also covers the division of the gas grid, flaring and alternative methods of emptying the pipes.</p> <p>The mathematic part of the thesis showed that the gas flow speed rises very high and the temperature drops below zero centigrade. It was also discovered that it takes more than a day to empty the gas pipe. The usage of the mobile flaring systems is challenging also because the necessary auxiliary systems raise the price of the flaring systems very high.</p>	
Keywords	natural gas, flare, flaring

# Sisällys

## Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Ilmasto	2
2.1	Ilmaston synty	2
2.2	Kasvihuonekaasut	4
2.3	Hiilen kiertokulku	5
2.4	Hiilidioksidi	6
2.5	Metaani	8
2.6	Metaanin polttotekniset ominaisuudet	9
2.6.1	Syttyminen	9
2.6.2	Palamisnopeus	10
2.6.3	Palamisyhtälöt	10
2.6.4	Palamisilman tarve	10
2.6.5	Ilmakerroin	11
2.6.6	Metaanin muodostuminen ja tuotanto	11
2.7	Ilmastopimukset	13
3	Maakaasuverkosto	15
3.1	Maakaasun siirto	15
3.2	Siirtoputkisto	16
3.2.1	Jakelu- ja käyttöputkisto	17
3.2.2	Paineenvähennys-, venttiili- ja linkkiasema sekä linjasulkuventtiilit	17
3.2.3	Kompressoriasema	18
4	Kaasun virtaus putkessa	18
4.1	Kaasujen tilanmuutokset	18
4.2	Palautuva adiabaattinen tilanmuutos	19

4.3	Isentrooppinen suppeneva suutin	20
4.4	Reynoldsin luku	23
4.5	Laminaarinen virtaus	23
4.6	Turbulenttinen virtaus	24
5	Esiselvitys maakaasuputken tyhjennysmenetelmistä	25
5.1	Soihdutus	25
5.2	Kiinteät soihtutyypit	25
5.3	Liikuteltavat soihdut	27
5.4	Soihdun komponentit	28
5.4.1	Soihdun suunnittelu	28
5.4.2	Ympäristön huomioiminen	30
5.4.3	Sytytys- ja tarkkailujärjestelmät	31
5.5	Ulospuhallus	33
5.6	Komprimointi	33
6	Laskelmat	35
6.1	Putken tyhjentyksen yksinkertainen mallinnus	35
6.2	Putkessa olevan metaanin määrittäminen	40
7	Yhteenveto	43
8	Lähteet	46

## Liitteet

Liite 1. Paineenalennuslaskut

Liite 2. Maakaasuputken tyhjennykseen kuluva aika

## Lyhenteet

AAU	(Assigned Amount Unit) Kioton pöytäkirjan peruspäästöyksikkö.
CER	(Certified Emission Reduction) Päästövähennys, joka vastaa yhtä tonnia hiilidioksidia. Syntyy kehitysmaissa toteutettavista puhtaan kehityksenmekanismihankkeista, joissa vähennetään päästöjä.
ERU	(Emission Reduction Unit) Päästövähennysyksikkö, joka syntyy teollisuusmaissa toteutettavista yhteistoteutushankkeista.
RMU	(Removal Unit) Poistoyksikkö, joka syntyy nielujen lisäyksistä.
EUA	(EU Emission Allowance): EU:n päästöoikeus.
GWh	Gigawattitunti.

## 1 Johdanto

Soihdutuksella tarkoitetaan haihtuvien orgaanisten yhdisteiden polttokäsittelyä. Maailmassa soihdutetaan ja päästetään taivaalle satojen miljoonien kuutioiden edestä maakaasua vuosittain. Rahassa mitattuna määrä on miljardien eurojen luokkaa. Pelkästään Afrikassa soihdutetun kaasun sisältämällä energiamäärällä voitaisiin tyydyttää lähes puolet maanosan energiantarpeesta. Jos vuosittain soihdutetun maakaasun määrää verrataan Euroopassa kulutettavan kaasun määrään, niin se on 30 prosenttia vuosittaisesta kaasun kulutuksesta. [Global Gas Flaring Reduction 2013.]

Tämän insinööriyön tavoitteena on tehdä esiselvitys liikuteltavan soihdun käyttömahdollisuuksista *Gasum Oy:n* maakaasun siirtoverkostossa ja esitellä myös muita vaihtoehtoja soihdutukselle.

Työn alussa tarkastellaan ilmastoa ja kasvihuonekaasuja. Työssä perehdytään kaasun virtaukseen putkessa teorian ja yhtälöiden avulla. Tällä on voitu laskennallisesti havainnollistaa maakaasuputken tyhjennykseen liittyviä haasteita. Esiselvityksessä on käyty läpi maakaasuverkoston jaottelua, soihdutusta ja mahdollisia vaihtoehtoja putken tyhjennykselle.

Työn laskennallisessa osuudessa mallinnetaan kaasun ulosvirtausta maakaasuputkesta sekä maakaasuputken sisältämän kaasun määrän polttamiseen kuluvaa aikaa valitulla soihdulla yksinkertaisia menetelmiä käyttäen.

*Gasum Oy*, jota varten esiselvitys on tehty, on pääosin suomalaisessa omistuksessa oleva osakeyhtiö. *Gasumin* omistavat *Fortum Heat and Gas Oy* (31 %), Suomen valtio (24 %), *OAO Gazprom* (25 %) sekä *E.ON Ruhrgas International GmbH* (20 %). [Gasum konsernin yritysraportti 2012: 2.]

*Gasum-konserni* koostuu emoyhtiöstä ja kuudesta eri tytäryhtiöstä. Emoyhtiö on *Gasum Oy* ja sen tytäryhtiöt ovat *Gasum Paikallisjakelu Oy*, *Gasum Energiapalvelut Oy*, *Gasum Tekniikka Oy*, *Gasum Eesti AS*, *Kaasupörssi Oy* sekä *Helsingin Kaupunkikaasu Oy*. Seuraavaksi erittelen lyhyesti *Gasum Oy:n* ja sen tytäryhtiöiden toimenkuvat ja vastualueet. *Gasum Oy* huolehtii siitä, että maakaasua on riittävästi suomalaisten asiakkaiden saatavilla. Se hankkii maakaasun venäläiseltä *Gazpromilta* ja toimii tuk-

kumyyjänä suurasiakkaille. Lisäksi se takaa maakaasun luotettavan siirron myyjältä asiakkaalle. Se huolehtii myös siirtoverkoston laitteiden, putkien, valvontalaitteiden sekä kompressorien kunnan ja siirtokapasiteetin vastaavuudesta asiakkaan tarpeisiin. *Gasum Paikallisjakelu Oy:n* vastuulla on konsernin kaasun paikallisten jakeluverkkojen toiminta, joita on kahdeksalla paikkakunnalla. *Gasum Energiapalvelut Oy* taas myy maakaasua pienille ja keskisuurille yrityksille sekä kotitalouksille. Se tarjoaa myös maakaasun käyttöön tarvittavat laitteet ja palvelut. Lisäksi jakeluverkostojen suunnittelu ja rakennus kuuluvat *Gasum Energiapalvelut Oy:n* toimenkuvaan. *Gasum Tekniikka Oy:n* vastuulla on *Gasum-konsernin* liiketoimintojen asennus- ja kunnossapitotyöt. *Gasum Eesti AS* myy maakaasua niin pienille kuin keskisuurillekin yrityksille sekä kotitalouksille Tallinnan ympäristössä Virossa. *Kaasupörssi Oy:lla* on ollut internetissä vuodesta 2001 alkaen markkinapaikka, jossa käydään kauppaa maakaasusta sekä päästökiintiöistä. *Kaasupörssissä* voidaan ostaa lisäeriä tukkuhinnan ylittävään kaasun tarpeeseen sekä myydä käyttämättä jääneet ylimääräiset kaasuerät. Vuonna 2012 *Kaasupörssissä* ostettiin ja myytiin maakaasua jopa 2636 GWh:n edestä, joka vastasi noin 8 %:n osuutta koko Suomen luonnonkaasun käytöstä. *Helsingin Kaupunkikaasu Oy* omistaa Helsingin maakaasuverkoston. *Gasum Oy* kehittää myös biokaasun tuotantoa sekä jakelua maakaasuverkoston välityksellä yhteistyössä *Biovakka Suomi Oy:n* kanssa. [Gasum yritysinfo; Gasum kaasupörssi.]

## 2 Ilmasto

### 2.1 Ilmaston synty

Ilmastolla tarkoitetaan sään tilastollisia ominaisuuksia. Maan ilmasto on muuttunut sen syntyhetkistä lähtien yli 4,6 miljardin vuoden ajan. Silloin auringon säteily oli vähäisempää kuin tällä hetkellä, mutta ilmasto oli lämmin ilmakehän hiilidioksidin ja muiden kasvihuonekaasujen korkeiden pitoisuuksien vuoksi. Kansainvälisten tutkimusten mukaan jääkaudet kylmensivät ilmastoa ainakin kahdesti. Ensin 2,3 miljardia vuotta sitten ja sen jälkeen 900 miljoonaa vuotta sitten, minkä jälkeen alkoi nopeasyklinen jääkausijakso. Tämän poikkeuksellisen jakson aikana maa muuttui jäiseksi palloksi kahteen kertaan: 760–700 ja 620–590 miljoonaa vuotta sitten. Näiden jääkausijaksojen jälkeen ilmastolle ovat olleet tyypillisiä lämpimämmät jaksot, jotka ovat lopulta päättyneet jääkausiin. Noin 30 miljoonaa vuotta sitten muodostui eteläinen napa-alue, kun Etelämanner siirtyi lähemmäs etelänapaa. Napa-alueen muodostumisen jälkeen ilmasto muuttui viileäm-



mäksi, jonka vaikutuksesta pohjoisen pallonpuoliskon mantereille alkoi muodostua napajäätikkö lähes kolme miljoonaa vuotta sitten. Tätä taitekohtaa kutsutaan kvartääri-kaudelle siirtymiseksi, jolle on ollut ominaista jääkaudet ja niiden välisten lämpimien interglasiaalien vaihtelu. [Bovet 2008: 34.]

Planeettamme ilmastoon ovat aikojen saatossa vaikuttaneet useat eri tekijät: auringon toiminta, maapallon asema kiertoradallaan, mannerlaattojen liikkeet, merivirtaukset sekä ilmakehän optiset ominaisuudet, jotka riippuvat muun muassa pienhiukkasten määrästä ilmakehässä. [Bovet 2008: 34.]

Valtamerien pohjasedimenttinäytteitä tutkimalla on saatu tietoa jääkausien vaihteluista viimeisen viiden miljoonan vuoden ajalta. Kuluneen miljoonan viime vuoden aikana jääkausien kesto on ollut keskimäärin 100 000 vuotta. Etelämantereella sijaitsevilla tutkimusasemilla, Vostokissa ja Dome C:ssä, tehtyjen kairausten näytteistä on saatu tietoa maan ilmastosta sekä kasvihuoneilmästä ainakin 650 000 vuoden takaa. Näytteitä tutkimalla on huomattu suurten jääkausien jaksollisuus, joka vastaa maapallon kiertoradan vaihteluita. [Bovet 2008: 34.]

Etelämantereen kairausnäytteiden jäästä ja sen sisältämistä ilmakehän hiilidioksidipitoisuudesta on löydetty tietoa ilmakehän hiilidioksidipitoisuudesta ennen teollistumista. Ilmakehän hiilidioksidipitoisuus oli ennen teollista aikakautta jopa 50 prosenttia korkeampi kuin edellisen jääkauden viileimpänä ajanjaksona noin 20 000 vuotta sitten. Merkittävää oli se, että näytteistä huomattiin metaanipitoisuuden kaksinkertaistuminen kyseisten ajanjaksojen välillä. Ilmakehän hiilidioksidi- ja metaanipitoisuudet ovatkin vaihdelleet 650 000 vuoden ajan yhdessä Etelämantereen ilmaston kanssa. Sen perusteella voidaan osoittaa, että auringon säteilyenergia sekä kasvihuonekaasupitoisuudet ovat vaikuttaneet jääkausien ja interglasiaalien jaksotteluun. [Bovet 2008: 34.]

Grönlannissa suoritetujen tutkimustulosten mukaan sieltä ei ole löydetty viimeisintä interglasiaalia vanhempaa jäätä. Saaren jäät ovat kuitenkin antaneet tietoa 25:stä erittäin nopeasta ja merkittävästä ilmastomuutoksesta viimeisimmän jääkauden ja sitä seuranneen sulamisjakson ajalta. Ilmasto on voinut muutamassa vuosikymmenessä lämmentä jopa 16 °C keskellä Grönlantia. Lämpenemisiä ovat seuranneet hitaammat viilenemiset. Ilmastomuutoksilla on ollut maapallon laajuisia seurauksia ja niihin näyttää liittyneen suuria muutoksia merivirtauksissa sekä ilmakehän kiertoliikkeessä. Nämä äkkinäiset muutokset ovat tärkeitä sekä maapallon ilmaston tulevan kehityksen ymmär-

tämisen kannalta että Etelämantereella havaitun yhteyden ilmaston ja kasvihuoneilmiön välillä. [Bovet 2008: 35.]

## 2.2 Kasvihuonekaasut

Maapallolla elämän kehityksen ja ylläpidon mahdollistavat olosuhteet ovat kasvihuonekaasujen ansiota, joista merkittävimpiä maapallon ilmakehässä ovat vesihöyry ( $\text{H}_2\text{O}$ ) ja hiilidioksidi ( $\text{CO}_2$ ). Kasvihuonekaasujen yhteydessä puhutaan tilavuuden miljoonasosista eli *parts per million* tai tilavuuden miljardisosista eli *parts per billion*. Kasvihuonekaasujen ansiosta maapallon keskimääräinen pintalämpötila on tällä hetkellä noin  $14\text{ }^\circ\text{C}$ , mutta ilman niiden läsnäoloa ilmakehässä lämpötila olisi  $33$  astetta matalampi eli  $-19\text{ }^\circ\text{C}$ . [Räisänen 2005: 1–3.]

Ilmakehässä muita luonnostaan esiintyviä kasvihuonekaasuja ovat vesihöyryn ja hiilidioksidin lisäksi metaani ( $\text{CH}_4$ ), dityppioksidi ( $\text{N}_2\text{O}$ ) sekä otsoni ( $\text{O}_3$ ). Ilmakehän yleisimmät kaasut kuten typpi ( $\text{N}_2$ ), happi ( $\text{O}_2$ ) ja argon (Ar) eivät tutkimusten mukaan edistä kasvihuoneilmiötä. Ihmisen tuottamia kasvihuonekaasuja ovat muun muassa fluorihiihivedyt (HFC), perfluorivedyt (PFC), kloori-fluoriyhdisteet (CFC) sekä rikkiheksafluoridi ( $\text{SF}_6$ ). [Kasvihuonekaasut lämmittävät 2012.]

Kasvihuonekaasujen vaikutukset jaetaan suoriin ja epäsuoriin vaikutuksiin. Suoralla vaikutuksella tarkoitetaan sitä, kun kasvihuonekaasu itsessään estää lähtevää lämpösäteilyä ja siten kohottaa maapallon lämpötilaa. Epäsuoralla vaikutuksella taas tarkoitetaan sitä, kun kasvihuonekaasu vaikuttaa muiden kasvihuonekaasujen pitoisuuteen sekä pilvien koostumukseen ilmakehässä. Tämä estää heijastuvan lämpösäteilyn kulkua avaruuteen. [Quaas ym. 2004: 1–5; Prather 2003: 1–3.]

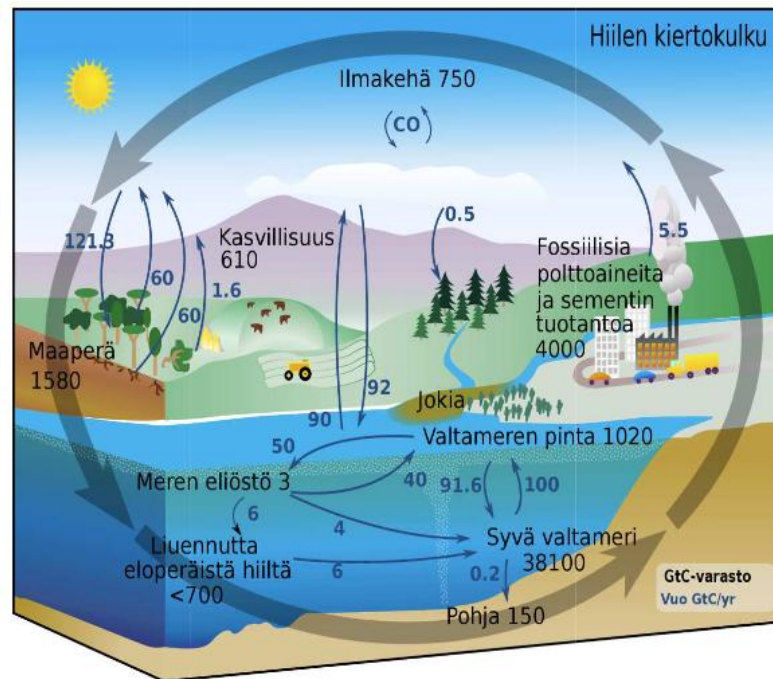
Kasvihuonekaasut absorboivat itseensä infrapuna- eli lämpösäteilyä, mutta eivät laisinkaan näkyvää valoa. Kasvihuonekaasun molekyyli rakenne kykenee absorboimaan lämpösäteilyä tietyillä aallonpituuksilla. Kaasumolekyylin absorboima lämpösäteily saa aikaan lämpöliikkeen voimistumista ja värähtelyä. Lämpöliikkeen kasvaessa molekyyliä ympäröivä ilman lämpötila alkaa kohota. Molekyylit heijastavat infrapunasäteilyä myös ympäristöönsä ja lopulta takaisin maanpinnalle. [Toivainen 2007: 245–246.]

### 2.3 Hiilen kiertokulku

Satojen miljoonien vuosien ajan maan ilmastossa on toiminut dynaaminen tasapaino, joka säätelee hiilen kiertoa. Hiili kiertää tässä mekanismeissa kiinteästä olomuodosta kaasumaiseksi ja takaisin - biosfääristä ja valtameristä ilmakehään ja takaisin. [Bovet 2008: 31–32]

Hiilen kiertokulkuun tuli muutos teollisen vallankumouksen myötä 1700- ja 1800-lukujen taitteessa höyrykoneen keksimisen ja kivihiilen polton seurauksena. Myöhemmin teollistumisen kehittyessä muiden fossiilisten polttoaineiden, kuten öljyn, hiilen ja maakaasun käyttö yleistyi. Maaperästä ja valtameren alta louhittiin kymmeniä miljardeja tonneja hiiltä, joka päästettiin ilmakehään erilaisten päästölähteiden tuottamina. Päästölähteistä esimerkkeinä ovat maailmanlaajuinen teollisuus sekä energiantuotanto. Arviolta 45 % ihmiskunnan 1700-luvulta lähtien tuottamasta hiilidioksidista on vielä tälläkin hetkellä ilmakehässä. Tästä hiilidioksidista 30 % on edelleen valtamerissä ja loput 15 % biosfääriin ja maaperään sitoutuneena. Äkillisellä hiilen vapautumisella muutettiin nopeassa kierrossa ja ilmakehässä olevan hiilen määrää. Näiden fossiilisten kerrostumien syntyyn kului miljardeja vuosia, mutta niiden palauttaminen ilmakehään tapahtui vain muutamassa vuosikymmenessä. [Bovet 2008: 31–32; Suomen nielut 2012.]

Kuvassa 1 on esitetty biosfääri ja valtameret, jotka yhdessä muodostavat valtavan hiilivaraston eli hiilinielun. Nämä nielut sitovat hiiltä ilmakehästä ja siirtävät sen takaisin maahan tai karbonaatteina mereen. Näihin hiilivarastoihin on sitoutunut lähes puolet ihmisen aiheuttamista päästöistä. [Bovet 2012: 31–32.]



Kuva 1. Hiilen kiertokulku maapallolla [Yhä enemmän hiilidioksidia jää ilmaan 2009].

On mahdollista, että meriveden lämpötilan nousu vähentää merten kykyä muodostaa karbonaatteja. Lämpötilan nousu muun muassa hidastaa merivirtoja Grönlannin korkeudella, joissa näitä karbonaattikerrostumia syntyy. [Bovet 2008: 31–32; Sabine & Feely 2007.]

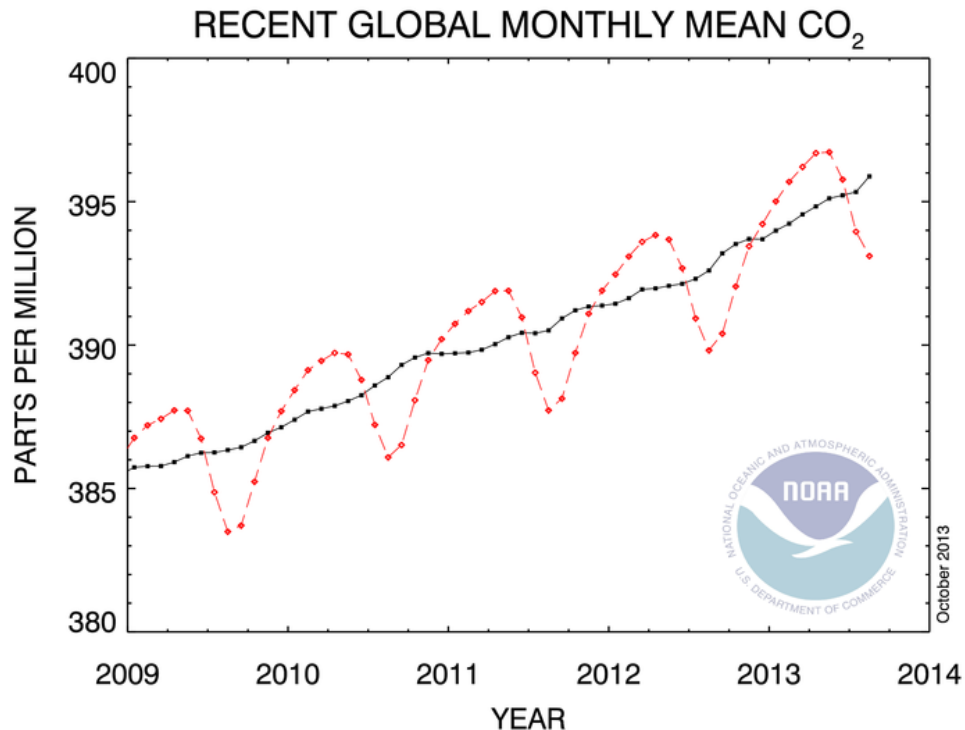
Tällä hetkellä biosfäärin arvioidaan voivan luontaisesti kierrättää kolmesta neljään gigatonnia hiiltä vuodessa. Biosfäärin kyky sitoa hiiltä heikkenee ajan kuluessa. Merkittävimpiä syitä tähän ovat: aavikoituminen, laajat metsien hakkuut sekä maatalouden ja kasvavien kaupunkien tarvitsemat uudet maa-alueet. [Bovet 2008: 31–32.]

## 2.4 Hiilidioksidi

Hiilidioksidimolekyylillä,  $\text{CO}_2$ , on yksi kuudesta Kioton pöytäkirjassa määritellyistä kasvihuonekaasuista. Hiilidioksidi koostuu kahdesta happiatomista sekä yhdestä hiiliatomista. Yhdessä nämä atomit muodostavat kemiallisen yhdisteen. Hiilidioksidi on tärkeä elämää ylläpitävä kaasu. Luonnossa sitä esiintyy yhtenä ilman aineosana (noin 0,03 %) sekä veteen liuenneena. Hiilidioksidi on väritön, hajuton sekä ilmaa raskaampi kaasu. [Europa 2011.]

Hiilidioksidi on ihmiskunnan tuottamista kasvihuonekaasuista yksi merkittävimmistä. Sen pitoisuutta on mitattu ilmakehästä 1950-luvulta saakka. Sitä varhaisempien aikojen pitoisuuksia on saatu selville tutkimalla napajäätiköiden sisältämiä kaasukuplia. [Hiilidioksidi ja hiilen kiertokulku 2012.]

Ihmiskunta on vaikuttanut toiminnallaan ilmakehän toimintaan muun muassa lisäämällä kasvihuonekaasujen määrää, vähentämällä hiilidioksidia sitovaa kasvillisuutta, ohentamalla yläilmakehän otsonikerrosta sekä lisäämällä hiukkaspitoisuuksia. Merkittävimmäksi hiilidioksidipäästöjen lähteeksi on muodostunut fossiilisten polttoaineiden, kuten hiilen, öljyn sekä maakaasun käyttö energiantuotannossa ja liikenteessä. Kasvihuonekaasuja syntyy myös teollisuuden prosesseissa, kaatopaikoilla, maataloudessa sekä metsäpaloissa. Fossiilisista polttoaineista peräisin olevat hiilidioksidipäästöt olivat vuonna 2011 hiilidioksidiksi muutettuina 31,6 gigatonnia vuodessa. Kuvassa 2 näkyy maailmanlaajuinen hiilidioksidipitoisuus jokaisen kuukauden keskiarvona, jota mitataan Mauna Loan mittausasemalla, Yhdysvalloissa. Metsien hävityksestä syntyneen päästöt tunnetaan huonosti ja niistä on tehty vain arvioita. [Hiilidioksidi ja hiilen kiertokulku 2012; International Energy Agency 2012.]



Kuva 2. a) Punainen katkoviiva ilmoittaa kuukausien puolivälien keskiarvot. b) Musta viiva sisältää korjauksen, jossa vuodenaikojen vaihtelu otetaan huomioon. [Recent Global Monthly Mean CO<sub>2</sub> 2013.]

Hiilidioksidin pitoisuus on mittausten mukaan noussut teollistumista edeltävän ajan suunnilleen 280 ppm:stä yli 400 ppm:ään. Nousua on siis lähes 40 %. Suomessa hiilidioksidipitoisuuksia on mitattu vuodesta 1994 asti Ilmatieteen laitoksen ylläpitämällä GAW-mittausasemalla (Global Atmosphere Watch), joka sijaitsee Sammaltunturin laella Ylläs-Pallastunturin kansallispuistossa. Vuodenaikojen vaihtuessa hiilidioksidipitoisuus tilapäisesti putoaa, kun pohjoisen pallonpuoliskon maa-alueiden kasvit ottavat käyttöönsä suuria määriä hiilidioksidia yhteyttämistä varten. Syksyllä ja talvella kasveja ja maaperästä vapautuu hiilidioksidia takaisin ilmakehään. Hiilidioksidin elinikä ilmakehässä on pitkä, että kaasu ehtii sekoittua tasaisesti ilmakehään. Täten yksittäisen mittausaseman tiedot edustavat suhteellisen tarkasti myös ilmakehää kokonaisuudessaan. [Hiilidioksidipitoisuus ylittänyt Pallaksella 400 ppm:n tason 2012.]

## 2.5 Metaani

Maakaasu koostuu pääasiassa metaanista ( $\text{CH}_4$ ), mutta sisältää myös muita hiilivetyjä: etaania, butaania, propaania ja lisäksi myös hiilidioksidia ( $\text{CO}_2$ ), rikkivetyä ( $\text{H}_2\text{S}$ ), typpeä ( $\text{N}_2$ ), heliumia (He) sekä vesihöyryä ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Metaani koostuu neljästä vety- ja yhdestä hiiliatomista. [Gasum maakaasun tuotetiedote.]

Taulukko 1. Eräiden hiilivetyjen ominaisuuksia [Suomen kaasuyhdistys ry 2008: 9].

	Metaani	Propani	Butaani
Molekyylikaava	CH <sub>4</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>
Molekyylipaino, kg/mol	16,04	44,09	58,12
Tiheys, kg/m <sup>3</sup> n (kaasumaisena normaaliloltilassa)	0,72	2,01	2,70
Suhteellinen tiheys kaasumaisena (ilma 1,293 kg/m <sup>3</sup> n) <sub>3</sub>	0,56	1,56	2,08
Kiehumispiste (atm), °C	-161,5	-42,1	-0,5
Tehollinen lämpöarvo, kWh/m <sup>3</sup>	10,0	26,0	34,1
kWh/kg	13,9	12,8	12,7
MJ/m <sup>3</sup> n	36,0	93,6	122,8
MJ/kg	50,0	46,3	45,7
Kinem. viskositeetti, m <sup>2</sup> /s	14,5	3,7	2,6
Syttymislämpötila, °C	650	510	490
Wobbe-arvo (teholl.), MJ/m <sup>3</sup> n	47,6	75,0	85,8
Teoreettinen palamislämpötila ilmassa, °C (Lambda = 1,0)	1915	1925	1900
Palamisnopeus ilmassa, cm/s	41	45	42
Palamisilman tarve (Lambda = 1,0), m <sup>3</sup> n/m <sup>3</sup> n kaasua	9,6	24,3	32,0

## 2.6 Metaanin polttotekniset ominaisuudet

### 2.6.1 Syttyminen

Kaasujen syttymisen edellytyksenä on palamiskelpoisen seoksen aikaansaaminen. Maakaasua pitää olla ilmassa vähintään 5 til-%, mutta kuitenkin alle 15 til-%, jotta se syttyisi. Syttymisrajojen tarkat arvot riippuvat palamisilman lämpötilasta sekä happipitoisuudesta. Happea lisäämällä voidaan laajentaa syttymisaluetta. Kaasumaisille polttoaineille on suhteellisen kapean syttymisalueen lisäksi tunnusomaista korkea syttymislämpötila. Maakaasulla syttymislämpötila on 600–650 °C:n välillä. Huoltotöiden aikana

putkistoon voidaan lisätä inerttikaasua, hiilidioksidia tai typpeä, kaasuseoksen syttymisrajan kasvattamiseksi. [Suomen kaasuyhdistys ry 2008:12.]

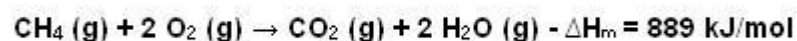
### 2.6.2 Palamisnopeus

Palamisnopeus on palamisrintama etenemisnopeus syttymiskelpoisessa seoksessa. Palamisnopeus on ratkaiseva tekijä liekin muodostuksen ja hallinnan kannalta. Palamisnopeuden on oltava tasapainossa kaasun virtausnopeuden kanssa. [Suomen kaasuyhdistys ry 2008: 13.]

Liekin kokoon, muotoon ja stabiiliuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa polttimen palopään ja kaasusuuttimen muotoilu ja mitoitus sekä palamisilman ja kaasun paine, nopeus ja sekoitustapa. Monesta tekijästä riippuva palamisnopeus on maakaasulla tavallisesti alle puoli metriä sekunnissa. [Suomen kaasuyhdistys ry 2008: 13.]

### 2.6.3 Palamisyhtälöt

Maakaasun palamisreaktio on monimutkainen ja moniosainen tapahtuma koostuen sadoista eri reaktioista ja välivaiheista. Metaanin palaminen voidaan kuitenkin yksinkertaistaa reaktioon:



Metaanin palamisreaktio on eksoterminen reaktio, eli siitä vapautuu lämpöä. Puhtaan metaanin palaessa muodostuu hiilidioksidia ja vesihöyryä. [Suomen kaasuyhdistys ry 2008: 14.]

### 2.6.4 Palamisilman tarve

Kun tunnetaan reaktio, aineiden moolimäärät, massat ja tiheydet sekä ilman koostumus, voidaan laskea teoreettinen palamisilman minimimäärä. Metaanilla teoreettinen



eli stoikiometrinen palamisilman tarve on  $9,6 \text{ m}^3$  kuten taulukosta 1 voidaan nähdä. [Suomen kaasuyhdistys ry 2008: 15.]

#### 2.6.5 Ilmakerroin

Täydellinen palaminen vaatii käytännössä teoreettista määrää enemmän palamisilmaa, mutta maakaasulla ilmaylimäärä voidaan kuitenkin pitää pienenä. Tyypillisesti maakaasua poltettaessa päästään jopa ilmakertoimen arvoon 1,1. Liian suurella ilmaylimäärällä heikennetään palamishyötysuhdetta ja ali-ilmalla palamisessa muodostuu häkää sekä savukaasuihin jää palamattomia hiilivetyjä. Myös nokea voi syntyä. Palamista voidaan säätää savukaasumittausten avulla. Mittaamalla happi- sekä häkäpitoisuudet voidaan saavuttaa lähes täydellisen palamisen olosuhteet. [Suomen kaasuyhdistys ry 2008: 16.]

#### 2.6.6 Metaanin muodostuminen ja tuotanto

Metaania muodostuu luontaisesti bakteerien hajottaessa orgaanista ainesta hapettomissa olosuhteissa: valtamerissä, termiittien vaikutuksesta, kosteikoissa, soilla, riisipeltoilla sekä karjaeläinten suolistoissa. Vuoden aikana luonnossa vapautuu arviolta 150–270 miljoonaa tonnia metaania. [Brockberg 1996.]

Maakaasua saadaan poraamalla maaperästä, jossa se on muodostunut kovassa paineessa miljoonien vuosien aikana hiiliperäisten organismien hajotessa. Sitä on öljylähteissä vapaana kaasuna tai lienneena öljyyn, maakaasuesiintymissä, kivihiihi- sekä öljyliuske-esiintymissä, liuskekaasuna liuskekivimuodostumissa sekä maakaasuhydraatteina, eli metaaniklatraatteina, jäähän kiinnittyneenä. [Klemola 2013: 10.]

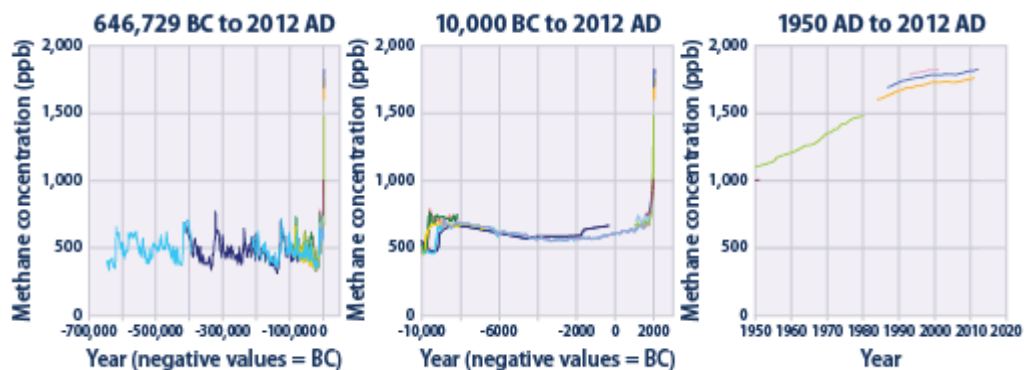
Suurimmat maakaasuvarat sijaitsevat Lähi-idässä ja entisen Neuvostoliiton alueilta. Myös Norjasta, Kanadasta sekä Yhdysvalloista on löydetty merkittäviä maakaasuesiintymiä. Vuonna 2011 niin sanotut tavanomaiset maakaasuvarat olivat noin  $187 \text{ Tm}^3$ , eli noin 1230 miljardia öljytynnyriekvivalenttia, lähes samaa suuruusluokkaa kuin öljyvarat. [Klemola 2013: 8.]

Eri tuotantolähteistä tuotettu maakaasu voi erota paljonkin kemiallisilta koostumuksiltaan, jolloin kaasun käyttötarkoitus voi sen mukaan vaihdella. Taulukossa 2 on esitetty eri alueilla tuotettujen maakaasujen kemiallisia koostumuksia. [Suomen maakaasuyhdistys ry 2008: 6.]

Taulukko 2. Maakaasun koostumus eri tuotantolähteiltä [Suomen maakaasuyhdistys ry 2008: 6].

Kenttä		Venäjä Urengoi	Saksa Goldenstedt	USA Kansas	Hollanti Groningen	Norja Troll
<b>Metaani</b>	CH <sub>4</sub>	98%	88,0%	84,1%	81,3%	93,2%
Etaani	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,8%	1,0%	6,7%	2,8%	3,7%
<b>Propani</b>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,2%	0,2%	0,3%	0,4%	0,4%
<b>Butaani</b>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,02%	–	–	0,4%	0,5%
<b>Typpi</b>	N <sub>2</sub>	0,9%	10,0%	8,4%	14,3%	1,6%
<b>Hiilidioksidi</b>	CO <sub>2</sub>	0,1%	0,8%	0,8%	0,9%	0,6%

Suomessa ei tiettävästi ole maakaasuesiintymiä, mutta maamme sijaitsee hyvinkin suurten maakaasuesiintymien läheisyydessä. Suomeen tuotava maakaasu tulee Länsi-Siperiasta Venäjältä Urengoin ja Jamburgin maakaasukentiltä, jotka ovat maailman suurimpia tuotantomäärittäjä. Suomeen tulevan maakaasun metaanipitoisuus on erittäin korkea, kuten taulukosta 2 voi nähdä. Kentät sijaitsevat 3300 kilometrin päässä Suomen rajalta. Suomeen kaasun myy venäläinen maakaasu- ja öljykonserni Gazprom. [Gasum Imatra – maakaasun portti Suomeen.]



Kuva 3. Metaanipitoisuudet ilmakehässä [Global Atmospheric Concentrations of Methane Over Time 2013].

Ihminen on välillisesti noussut merkittäväksi metaanintuottajaksi. Toiviaisen (2009) mukaan ilmakehään päätyvän vuosittain jopa 550 miljoonaa tonnia metaania (MMT),

joista kaksi kolmasosaa aiheutuu täysin ihmisen toiminnasta, kuten fossiilisten polttoaineiden tuotantoketjuista, maataloudesta, kaatopaikoista, metsien hävittämisestä sekä polttoprosesseista. Kuvassa 3 havainnollistetaan metaanin konsentraatioita sadoista tuhansista vuosista aina vuoteen 2012 saakka. Kuvan käyrät on saatu useiden jäänäytteidensä sekä ilmakehän mittauksien antamien tietojen perusteella. Ilmakehään vuosittain vapautunut metaani voidaan muuttaa hiilidioksidiekvivalenteiksi GWP-indeksiä käyttämällä. Kansainvälisen IPCC:n raportista käy ilmi, että luonnon metaaninielu voi sitoa itseensä arviolta 490–580 miljoonaa tonnia metaania. [Toiviainen 2007: 245–246; Biogeochemistry and Budgets of Methane 2007.]

## 2.7 Ilmastopöytäkirjat

Yhdistyneiden Kansakuntien ilmastopöytäkirja solmittiin vuonna 1992 YK:n ympäristö- ja kehityskokouksessa Rio de Janeirossa. Se tuli voimaan vuonna 1994 ja lähes kaikki maat ovat ratifioineet sen. Kioton pöytäkirja laadittiin vuonna 1997 YK:n kolmannessa ilmastokokouksessa. Sen tavoitteena oli vähentää teollisuusmaiden kasvihuonekaasupäästöjä 5,2 prosentilla vuoteen 1990 verrattuna. Päästövähennys oli saavutettava vuosina 2008–2012. [Kanerva 2012: 3–4.]

YK:n ilmastopöytäkirjasta täydentävä Kioton pöytäkirja tuli voimaan 16.2.2005 ja Suomi ratifioi pöytäkirjan yhdessä Euroopan unionin jäsenmaiden kanssa vuonna 2002. Se on ensimmäinen useiden maiden allekirjoittama sopimus, jonka avulla pyritään vähentämään ja seuraamaan ihmisten aiheuttamia kasvihuonekaasupäästöjä ja siten ehkäisemään tai hillitsemään ilmastonmuutosta kansainvälisesti. Kasvihuonekaasut, joita sopimus koskee, ovat hiilidioksidi, metaani, dityppioksidi, fluori-hiilivedyt, perfluorihiiilivedyt ja rikkiheksafluoridi. [Kanerva 2012: 5.]

Kioton pöytäkirjan ratifioivat teollisuusmaat sitoutuvat vähentämään velvoitteiden kautta vuosien 2008–2012 kasvihuonekaasupäästönsä alle tietyn prosenttiosuuden vuoden 1990 päästöistä. Pöytäkirjaan kuuluu velvoitekausia, joista ensimmäinen kesti 2008–2012 ja tällä hetkellä on käynnissä Kioton pöytäkirjan toinen velvoitekausi vuosille 2013–2020, josta sovittiin joulukuussa 2012 Dohan osapuolikokouksessa. [Kioton pöytäkirja 2013.]

Kioto sopimuksen toiseen velvoitekauteen on sitoutunut vähemmän maita kuin ensimmäiselle velvoitekaudelle. Lisäksi toisella kaudella on leikattu sallittua päästömäärää siltä osin kuin se ylittää vuosien 2008–2010 toteutuneet päästöt. Ensimmäiseltä velvoitekaudelta ylijääneet päästöyksiköt ovat voitu siirtää täysimääräisesti uudelle kaudelle, mutta niiden osto on rajoitettu merkittävästi ja kuuluvat erilliseen varantoon. Lähes kaikki Kioto toiselle velvoitekaudelle osallistuvat maat sekä EU-maat ovat päättäneet, etteivät osta ylijääviä päästöyksiköitä. [Kioto pöytäkirja 2013.]

Päästöyksiköllä tarkoitetaan Kioto pöytäkirjassa määriteltyä ilmastopoliittista "valuuttaa", jolla voidaan käydä kauppaa muiden sopimukseen kuuluvien maiden kesken ostamalla päästöoikeuksia. Yksi päästöyksikkö vastaa yhtä määrältään yhtä tonnia hiilidioksidia. Muita päästömarkkinoilla esiintyviä päästöyksiköitä ovat AAU:t, CER:t, ERU:t ja RMU:t. Edellä mainitut yksiköt ovat keskenään samanarvoisia ja suoraan vaihtokelpoisia. EU:n päästökaupan yksikkö on EUA, mutta sitä ei ole määritelty Kioto pöytäkirjassa päästöyksikkönä. [Kanerva 2012: 11; Energiamarkkinavirasto.]

Pöytäkirjassa on esitetty yleisen päästövähennystavoitteen lisäksi jokaisen sen ratifioineen maan maakohtaiset päästövähennystavoitteet. Pöytäkirja sisältää erilaisia laskentasaäntöjä sekä kertoimia, joihin maakohtaiset vähennykset perustuvat, esimerkiksi Suomen kerroin vähennyksille on 0,92. [Kioto pöytäkirjan toimeenpanon säännöt 2003: 22.]

Euroopan unioni käynnisti oman päästökauppajärjestelmänsä 1.1.2005, jossa otetaan huomioon vain hiilidioksidipäästöt. Päästökauppajärjestelmä velvoittaa kaikkia päästökaupan piirissä olevia yrityksiä seuraamaan päästöjään ja tilittämään vuosittain päästöjä vastaavan määrän päästöoikeuksia valtiolle. Päästöoikeuksilla käydään kauppaa EU:n laajuisilla päästöoikeusmarkkinoilla, joilla oikeuksille muodostuu markkinahinta. Yritysten liiketoiminnalle päästöjen muuttuminen maksulliseksi tuo uusia haasteita. Yritysten tulee huomioida päästökaupan kulut kannattavuuden ja riskienhallinnassa, tuotannosuunnittelussa, taloushallinnossa sekä strategisessa suunnittelussa. [Kanerva 2012: 25–30.]

Kasvihuonekaasujen vaikutusten välisiä suhteita voidaan verrata keskenään hiilidioksidiekvivalentteina, CO<sub>2-ekv</sub>, tai GWP-indeksillä. Ihmisen tuottamien kasvihuonekaasujen päästömäärät muunnetaan vastaamaan hiilidioksidin ilmastovaikutusta 20:n, 100:n ja 500 vuoden tarkastelujaksolla, jolloin esimerkiksi metaanipäästöjen vaikutus saadaan

vastaamaan hiilidioksidipäästöjä kertomalla ne luvulla 23. [Karjalainen; Solomon ym. 2007: 14–15.]

Kasvihuonekaasujen merkittävyyttä mitataan ilmakehän toiminnalle siis myös GWP-indeksillä (Global Warming Potential). Indeksien perusvertailukohtana pidetään ilmakehän vesihöyryä, jonka GWP on 0,0, koska se on luonnon säätökijä, johon ihminen ei toiminnallaan voi vaikuta. Hiilidioksidin GWP-indeksi on 1,0. Muiden kasvihuonekaasujen sekä aineiden GWP ilmoitetaan suhteena hiilidioksidin GWP-arvoon. [Karjalainen; Solomon ym. 2007: 14–17.]

Hallitusten välinen ilmastopaneeli IPCC arvioi vuonna 2007 maapallon keskilämpötilan kohoavan jopa 1,1–6,4 celsiusastetta kuluvaan vuosisadan aikana. Jotta ilmastonmuutosta voitaisiin hillitä, IPCC on arvioinut että kasvihuonepäästöjen leikkaus edellyttäisi jopa yli 60 prosenttia maailmanlaajuisesti, lisäksi hiilidioksidi ja metaani aiheuttavat jopa kolme neljäsosaa ilmastoon liittyvistä ongelmista. [Bovet 2008: 31–32; Suomen nielut 2012.]

### 3 Maakaasuverkosto

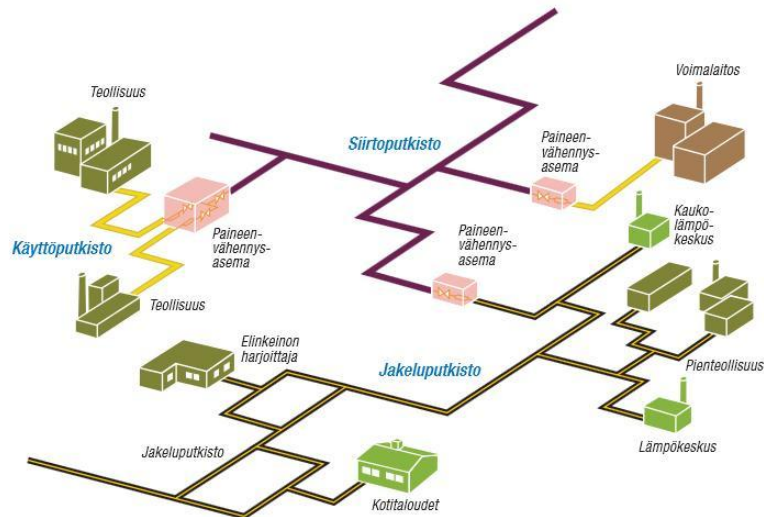
#### 3.1 Maakaasun siirto

Maakaasua siirretään asiakkaan käyttöön tuotantolähteiltä käsin paineistettujen putkistojen avulla. Putkistojen materiaali sekä koot vaihtelevat käyttötarkoituksen mukaan. Muun muassa olosuhteet, välimatkat, kuluminen, painetasot, lämpötilan vaihtelut sekä muut turvallisuuteen liittyvät tekijät asettavat vaatimuksia maakaasuputkistojen suunnittelulle ja rakentamiselle. Maakaasuverkkotoiminta, joka sisältää siirto- ja jakeluputkistot, on luvanvaraista toimintaa. Luvat verkon haltijoille eli putkiston omistajille myöntää *Energiamarkkinavirasto*. Käyttöputkiston omistaa yleensä maakaasun käyttöpaikan omistaja. [Suomen kaasuyhdistys ry 2008: 24–26.]

Maakaasuputkisto jaotellaan kuvan 3 mukaisesti osiin käyttötarkoituksen mukaan:

- siirtoputkistoon, jolla maakaasua siirretään jaettavaksi

- jakeluputkistoon, jolla maakaasua jaetaan siirtoputkistosta vähennetyllä paineella alueelliseen kulutukseen
- käyttöputkistoon, jolla maakaasua johdetaan vähennetyllä paineella kaasulaitteelle tai muuhun käyttökohteeseen [Suomen kaasuyhdistys ry 2008: 24].



Kuva 4. Maakaasuputkiston jaottelu [Suomen kaasuyhdistys ry 2008: 24].

### 3.2 Siirtoputkisto

Siirtoputkistolla siirretään korkeapaineista maakaasua käyttöalueiden läheisyyteen maanalaisissa siirtoputkistoissa. Putkisto sijaitsee 1–2 metrin peitesyvyydessä ja sen sijainti merkitään maastoon erillisillä merkintäpylväillä, joita on käytössä yli 10000 kappaletta. Nykyisissä siirtoputkissa kaasun paine on 25–54 baaria, mutta uusia putkia rakennetaan myös 80 baarin paineelle. Korkeapaineisen siirtoputkiston pituus on yli 1300 kilometriä. Putkistossa siirrettävän kaasun painetta nostetaan kompressoriasemilla. Siirtoputkistossa käytetään joko hitsattuja tai saumattomia paineenalaiseen käyttöön tarkoitettuja teräsputkia, jotka on pinnoitettu polyeteenimuovilla. Pinnoitteen antamaa korroosiosuojausta täydentää katodinen suojausjärjestelmä. Rakenneaineen tulee olla lujuudeltaan, muodonmuutoskyvyltään, sitkeydeltään ja hitsattavuudeltaan asennus- ja käyttöolosuhteisiin sopivaa tiivistettyä teräslaatua. Gasum vastaa maakaasun siirtoverkon toiminnasta ja sitä valvotaan vuorokauden ympäri keskusvalvomosta, joka sijaitsee Kouvolassa. [Suomen kaasuyhdistys ry 2008: 36; Gasum maakaasun siirtoverkostot; Gasum maakaasun jakeluputkiston rakentaminen 2010; 2–4.]

### 3.2.1 Jakelu- ja käyttöputkisto

Jakeluputkistolla tarkoitetaan Gasumin tai paikallisen energiayhtiön omistamaa ja ylläpitämää putkistoa, jolla jaetaan siirtoputkistossa kulkeva kaasu vähennetyllä paineella alueelliseen kulutukseen.

Jakeluputkistoissa vallitseva kaasun paine on yleensä 4–8 baaria ja käyttöputkistossa loppukäyttäjälle alle 4 baaria. Valtioneuvosto on säätänyt asetuksen maakaasun turvallisuudesta käsittelystä. Jakeluputkistot rakennetaan muovi- ja teräspankista. Käyttöputkistolla tarkoitetaan käyttäjän putkistoa, jolla maakaasua johdetaan käyttölaitteelle tai käyttökohteeseen. Käyttöputkiston materiaalina käytetään yleensä terästä, kuparia tai muuta maakaasukäyttöön tarkoitettua materiaalia käyttöpaineen sallimissa rajoissa. [Gasum maakaasun siirtoverkostot; Gasum maakaasun jakeluputkiston rakentaminen 2010; 2–4.]

### 3.2.2 Paineenvähennys-, venttiili- ja linkkiasema sekä linjasulkuventtiilit

Maakaasu johdetaan siirtoputkistosta paineenvähennysasemille. Asemien tehtävänä on alentaa siirtoputkiston painetta asiakkaan laitteille sopivaksi. Paineenvähennysasemalla mitataan kuluttajille menevä kaasumäärä. Paineenvähennysasemille on asennettu kaasuvuotohälyttimiä, automaattisia turvalaitteita sekä kaukovalvontalaitteistoja. Aseman ulkopuolelle on myös asennettu pääsulkuventtiili, jolla voidaan tarvittaessa sulkea putkiosuus. Siirtoverkostossa on 134 paineenvähennysasemaa.

Valvonta- ja hälytystiedot verkoston varrelta noudetaan ja siirretään Kouvolan keskusvalvomoon maakaasuverkoston oman tiedonsiirtojärjestelmän kautta. Nämä tiedonsiirtojärjestelmään kuuluvat linkkiasemat sijaitsevat pääasiassa venttiiliasemien läheisyydessä ja tiedonsiirtojärjestelmä koostuu 123 linkkiasemasta. Siirtoputkistoon asennetaan 8–32 km välein venttiiliasemia, joiden linjasulkuventtiileillä voidaan tarvittaessa katkaista kaasun siirto ja jakelu sekä tyhjentää putkiosuus kaasusta ulospuhaltamalla. Venttiiliasemat lisäävät verkoston käyttöturvallisuutta. Esimerkiksi siirtoverkostossa on yhteensä 125 venttiiliasemaa. Jakeluputkistoon on asennettu linjasulkuventtiilejä noin 2–15 kilometrin välein. Sulkuventtiilit mahdollistavat kaasun jakelun keskeytyksen häiriötilanteessa, jolloin putkiosuus voidaan tyhjentää kaasusta. Linjasulkuventtiilien alue on yleensä aidattu.

[Gasum maakaasun siirtoverkostot.]

### 3.2.3 Kompressoriasema

Kompressoriaseman, tai paineenlisäysaseman, tehtävänä on nostaa kaasun painetta ja siten lisätä maakaasuverkoston siirtokapasiteettia, koska maakaasun siirto taloudellisesti kannattavinta korkeassa paineessa. Kompressorien käyttötarve riippuu siirtoputkiston painetilanteesta. Siihen taas vaikuttaa maakaasun vuorokautinen menekki, käyttökäyminen verkoston alueella sekä tulopaine Imatralla. Suomen kompressoriasemat sijaitsevat Imatralla, Kouvolassa sekä Mäntsälässä. Kompressoriasemilla on käytössä yhteensä yhdeksän kaasuturbiinikäyttöistä turbokompressoria. Neljä turbokompressoista sijaitsee Imatralla, kolme Kouvolassa ja kaksi Mäntsälässä. Kompressorien käytävissä oleva kokonaisakseliteho on 64 MW. [Gasum maakaasun siirtoverkostot.]

## 4 Kaasun virtaus putkessa

### 4.1 Kaasujen tilanmuutokset

Kun kaasu on rajatussa ja suljetussa tilassa, sen tilaa voidaan kuvata kolmella muuttujalla: lämpötila, paine ja tilavuus. Lämpötilalle tulee käyttää kelvinasteikkoa ja paineelle absoluuttista suuruutta. Tilanmuutoksille on kolme erikoistapausta, jotka ovat isobaarinen, isoterminen ja isokoorinen. [Perttula 2000: 16.]

$$\frac{p \cdot V}{T} = \text{vakio} = m \cdot R_n \quad (1)$$

$p$  on absoluuttinen paine [Pa]

$V$  on tilavuus [ $m^3$ ]

$T$  on lämpötila [K]

$m$  on suljetussa tilassa olevan kaasun massa [kg]

$R_n$  on ominaiskaasuvakio [kJ/kgK]

Yhtälö voidaan johtaa vielä muotoon:



$$pV = nRT = \text{vakio} \quad (2)$$

$p$  on absoluuttinen paine [Pa]

$V$  on tilavuus [ $m^3$ ]

$T$  on lämpötila [K]

$n$  on ainemäärä [mol]

$R$  on ominaiskaasuvakio [kJ/kgK]

Isobaarisessa tilanmuutoksessa paine  $p$  pysyy vakiona kun taas isotermisessä tilanmuutoksessa lämpötila  $T$  pysyy muuttumattomana. Isokoorisessa tilanmuutoksessa tilavuus  $V$  ei muutu ja adiabaattisessa prosessissa ei tapahdu lämmönvaihtoa ympäristön kanssa. Sellaista tilanmuutosta, jossa systeemin rajapinnan läpi siirtyy lämpöä, kutsutaan polytrooppiseksi muutokseksi. Polytrooppiseen muutokseen liittyy myös kokeellisesti määritettävä polytrooppivakio ( $\gamma$ ). [Perttula 2000: 16.]

#### 4.2 Palautuva adiabaattinen tilanmuutos

Palautuvassa adiabaattisessa tilanmuutoksessa paine, lämpötila ja tilavuus  $V$  muuttuvat ja kahden muutostilan välillä vallitsee myös yleisen kaasujen tilanyhtälön mukainen riippuvuus:

$$\frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{p_2 \cdot V_2}{T_2} \quad (3)$$

$p_1$  on absoluuttinen paine alkutilassa [bara]

$V_1$  on tilavuus alkutilassa [ $m^3$ ]

$T_1$  on lämpötila alkutilassa [K]

$p_2$  on absoluuttinen paine lopputilassa [bara]

$V_2$  on tilavuus lopputilassa [ $m^3$ ]

$T_2$  on lämpötila lopputilassa [K]

Termi adiabaattinen tarkoittaa systeemin eristämistä ympäristöstä, jolloin lämpöenergiaa ei pääse siirtymään ulos systeemistä eikä systeemin sisään. Palautuva adiabaatti-

nen täydentää edellä mainittua termiä siten, että työaineena toimivan kaasun molekyylien keskinäinen paikka ei muutu vaikka etäisyys muuttuisi. Palautuva adiabaattinen tarkoittaa myös isentrooppista tilanmuutosta ja se on ideaalinen tapahtuma, jossa esimerkiksi eristetyssä systeemissä syntyvän kaasun puristustyön minimi saavutetaan palautuvalla adiabaattisella puristuksella ja suurin mahdollinen työ saadaan palautuvasta adiabaattisesta paisunnasta häviöttömänä. Palautuvat adiabaattiset tilanmuutokset voidaan ratkaista suhdeyhtälöitä käyttäen. [Perttula 2000: 16.]

$$\frac{T_0}{T_1} = \left( \frac{p_0}{p_1} \right)^{\left( \frac{\gamma-1}{\gamma} \right)} \quad (4)$$

$p_0$  on absoluuttinen paine alkutilassa [bara]

$T_0$  on lämpötila alkutilassa [K]

$p_1$  on absoluuttinen paine lopputilassa [bara]

$T_1$  on lämpötila lopputilassa [K]

$\gamma$  on lämpökapasiteettisuhde  $\frac{c_p}{c_v}$ .

#### 4.3 Isentrooppinen suppeneva suutin

Suppenevan suuttimen tarkoituksena on saavuttaa työaineelle äänen nopeus, joka vastaa käytetyn aineen kriittistä painetta  $p_{kr}$ . Suuttimen suppenevassa osassa työaine laajenee isentrooppisesti jäähtyessään paineen laskiessa. Ihannekaasulle, ilmalle sekä kaksiatomisille kaasuille kriittinen painesuhde on noin 0,53, mutta karkeissa laskuissa voidaan käyttää painesuhdetta 0,5. Jos kriittinen paine on yhtä suuri kuin ympäristön paine  $p_2$ , työaine purkautuu suuttimesta häiriöttömästi ja äänen nopeudella. Ympäristön paineen,  $p_2$ , ollessa pienempi kuin kriittinen paine, niin työaine laajenee äkillisesti suuttimen jälkeen ja sen sisältämä liike-energia muuttuu pyörteilyn takia lämpöenergiaksi. Jos kriittinen paine on pienempi kuin ympäristön paine, niin ulosvirtaus on häiriötöntä, mutta nopeus on alla äänen nopeuden. Kaavalla 5 voidaan laskea isentrooppisen tilanmuutos. [Perttula 2000: 16.]

$$\frac{T_1}{T_{kr}} = \left( \frac{p_1}{p_{kr}} \right)^{\left( \frac{\gamma-1}{\gamma} \right)} \quad (5)$$

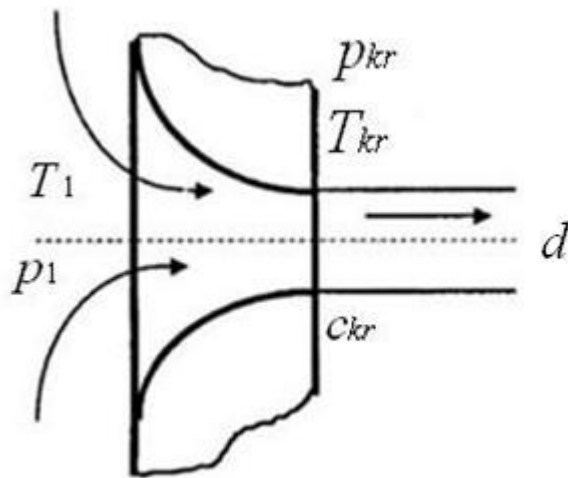
$p_1$  on absoluuttinen paine alkutilassa [bara]

$T_1$  on lämpötila alkutilassa [K]

$p_2$  on absoluuttinen paine lopputilassa [bara]

$T_2$  on lämpötila lopputilassa [K]

$\gamma$  on lämpökapasiteettisuhde  $\frac{c_p}{c_v}$ .



Kuva 5. Suppeneva suutin, muokattu [Perttula 2000: 113].

Suppenevan suuttimen toimintaa voidaan havainnollistaa kuvittelemalla virtauksen mukana kulkevaa partikkelia, jolla on tilavuus. Partikkelin kulkiessa kohti suuttimen suppenevassa päässä olevaa aukkoa, ympärillä olevan paineen ja lämpötilan laskiessa sen tilavuus kasvaa. Partikkelin ominaisentalpia muuttuu kappaleen saaman kineettisen energian lisäyksenä, mutta systeemin kokonaisentalpia pysyy vakiona koko virtauksen aikana, koska suutinta pidetään häviöttömänä. [Perttula 2000: 16.]

Suppenevan osuuden jälkeen muuttunut lämpötila ja äänen nopeus lasketaan käyttämällä niiden kriittisiä arvoja, niitä merkitään alaindeksillä kr.

$$h_1 = h_{kr} + \frac{c_{kr}^2}{2} \quad (9)$$

$h_1$  on entalpia suuttimen alussa [kJ/mol]

$h_{kr}$  on kriittinen entalpia suuttimen lopussa [kJ/mol]

$c_{kr}$  on kriittinen virtausnopeus suuttimen lopussa [m/s].

Kriittinen painesuhde:

$$p_{kr} = 0,5 \cdot p_1 \quad (10)$$

$p_{kr}$  on kriittinen paine suuttimen kärjessä [bara]

$p_1$  on paine ennen suutinta [bara].

Kriittinen nopeus suuttimen kärjessä:

$$c_{kr} = \sqrt{2 \cdot c_p \cdot (T_1 - T_{kr})} \quad (11)$$

$T_1$  on lämpötila ennen suutinta [°K]

$T_{kr}$  on kriittinen lämpötila suuttimen jälkeen [°K]

$c_p$  on aineen ominaislämpökapasiteetti vakiopaineessa.

$$h_{kr} = T_{kr} \cdot c_p \quad (12)$$

$T_{kr}$  on kriittinen lämpötila suuttimen kärjessä [°K]

$c_p$  on aineen ominaislämpökapasiteetti vakiopaineessa.

Suppenevan suuttimen purkausaukko määritetään ympyrän pinta-alan avulla, jotta voidaan ratkaista työaineen massavirta.

$$A = \frac{\Pi \cdot d^2}{4} \quad (13)$$

$A$  on suuttimen purkausaukon pinta-ala [m<sup>2</sup>]

$\Pi$  on matemaattinen vakio

$d$  on kappaleen halkaisija [m].

$$q_m = c_{kr} \cdot \rho \cdot A \quad (14)$$

$q_m$  on virtaavan työaineen massavirta [kg/s]

$c_{kr}$  on kriittinen virtausnopeus suuttimen lopussa [m/s]

$\rho$  on virtaavan työaineen tiheys [kg/m<sup>3</sup>]

$A$  on suuttimen purkausaukon pinta-ala [ $m^2$ ].

Metaanin määrä putkessa voidaan laskea sylinterin muotoisen kappaleen tilavuuden kaavan avulla.

$$V = \frac{\Pi \cdot d^2}{4} \cdot l \quad (15)$$

$V$  on tilavuus [ $m^3$ ]

$\Pi$  on matemaattinen vakio

$d$  on kappaleen halkaisija [ $m$ ]

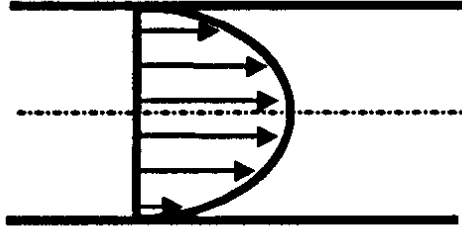
$l$  on kappaleen pituus [ $m$ ].

#### 4.4 Reynoldsin luku

Reynoldsin luku,  $Re$ , on dimensioton suure, jonka avulla kuvataan virtauksen luonnetta. Reynoldsin luvun ollessa pieni virtaus pysyy koossa ja virtaus on laminaarista; kun luku kasvaa, niin virtaus muuttuu turbulenttiseksi. [Perttula 2000: 64.]

#### 4.5 Laminaarinen virtaus

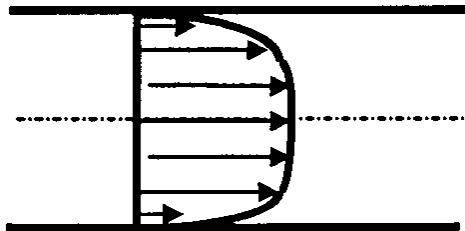
Laminaarisella virtauksella tarkoitetaan virtausta, jossa virtaavat partikkelit etenevät rinnakkaisina kerroksina virtauksen suuntaan. Ideaalisessa laminaarisessa virtauksessa partikkelit kulkevat erisuuruksilla nopeuksilla kuitenkin sekoittumatta. Pyöreissä putkissa virtaus määritellään laminaariseksi, kun Reynoldsin luku on  $\leq 2320$ . Kuvan 9 putkessa nopeusprofiili laminaarisissa virtauksissa katsojaan nähden on parabolinen, jossa rajakerroksilla etenevä virtaus on hitaampaa ja keskellä nopeampaa. [Perttula 2000: 64.]



Kuva 6. Laminaarinen virtaus [Perttula 2000: 65].

#### 4.6 Turbulenttinen virtaus

Tässä virtauksessa Reynoldsin luku on  $\geq 2320$ . Virtausnopeuden noustessa riittävän suureksi, rajakerroksien läheisyydessä kulkevat partikkelit alkavat kiihtyä virtauksen mukana ja pyörteillä. Kerroksittainen virtaus häiriintyy pyörteisyyden lisääntyessä ja lopulta sitä ei enää havaita ollenkaan, paitsi rajakerroksissa syntyy rikkonaista laminaarista virtausta. Nopeusprofiili turbulenttisessa virtauksessa näyttää tylpemmältä, kuin laminaarisessa virtauksessa. Kuvassa 10 on havainnollistettu turbulenttisen virtauksen muotoa, jossa pyörteiden muodostuminen ja virtaavan aineen sisäisen kitkan kompensoiminen rajakerrosten läheisyydessä kuluttaa energiaa. Virtausprofiili muuttuu tasaisemmaksi Reynoldsin luvun kasvaessa ja pinnanlaadun parantuessa. [Perttula 2000: 67.]



Kuva 7. 2 Turbulenttinen virtaus [Perttula 2000: 67].

## 5 Esiselvitys maakaasuputken tyhjennysmenetelmistä

### 5.1 Soihdutus

Soihtuja käytetään laajasti petrokemia- ja hiilivetyteollisuudessa turvakeinona, jolla saavutetaan turvallinen ja luotettava haitallisten höyryjen poisto prosessista. Soihtuilla käsiteltävät materiaalit ovat pääasiassa hiilivetyjä tai niiden ainesosia, jotka sisältävät sekä vetyä ja raskaita hiilivetyjä. Jätekaasut sisältävät usein haitallisia tai jopa myrkyllisiä höyryjä, jotka voidaan turvallisesti hallituissa olosuhteissa polttaa lähes vaarattomiksi. Yksittäisen soihdun suunniteltu polttokapasiteetti voi vaihdella kymmenistä kiloista tuhansiin tonneihin tunnissa, riippuen poltettavan kaasun koostumuksesta ja painetasosta. [Bader ym. 2011: 1.]

### 5.2 Kiinteät soihtutyypit

Teollisuuden prosesseissa käytetään yleensä kolmenlaisia soihtutyyppejä: yhden polttimen soihtua, usean polttimen soihtua sekä suljettu soihtua. Yhden polttimen soihtu voidaan varustaa savuttomalla polttojärjestelmällä, höyry- tai apuilmajärjestelmällä savuhaittojen poistamiseksi. Single-point-soihtujärjestelmä, eli yhden polttimen soihtu, suunnitellaan polttamaan haitalliset kaasut kohtisuoraan ylöspäin riittävän korkealla ja kaukana rakennuksista sekä laitteista. Soihtutyyppi on yleisin käytetty malli, joka on vakiinnuttanut paikkansa maalla sijaitsevien jalostuslaitosten joukossa niiden alhaisten käyttöpainneiden vuoksi (<1,7 bara). [Bader ym. 2011: 1.]

Usean polttimen soihtua, eli multi-point-soihtujärjestelmää, käytetään polttoprosessin tehostamiseksi. Se perustuu kaasuvirran jakamisen usean polttimen välille, jotka voidaan vaiheistaa ja niistä voidaan muodostaa usean polttimen ryhmiä. Kuvassa 9 oleva soihtu on varsin yleinen jalostamoiden sekä petrokemian prosesseissa käytetty multi-point-soihtujärjestelmä. Ne on suunniteltu saavuttamaan savuton poltto apujärjestelmien avulla. Multi-point-järjestelmä mitoitetaan vähintään 2,08 bara:n painetason järjestelmiin. [Bader ym. 2011: 2.]



Kuva 8. Multipoint-soihtujärjestelmä [Mushrif Trading & Contracting Co. 2011].

Kuvassa **10** on suljettu soihdutyyppe, jonka toimintaperiaatteena on piilottaa palava liekki suoralta näköyhteydeltä, vähentää soihdutuksesta syntyvää melusaastetta sekä suojata ympäristöä lämpösäteilyltä. Soihdun liekki palava liekki sijaitsee soihdutornin juurella. Suljettuja soihduttuja usein yhdistellään multi-point-soihtujärjestelmien tapaan, jotta suurempia tilavuusvirtoja voidaan turvallisesti prosessoida. Silloin murto-osaa suljetuista soihduista käytetään alhaisilla tilavuusvirroilla, kun tilavuusvirta kasvaa niin useampia soihduttuja otetaan käyttöön kapasiteetin mukaan. Porrastus auttaa maksimoimaan yksiköiden toimintaa kaikilla tilavuusvirroilla. [Bader ym. 2011: 2.]



Kuva 9. Suljettu soihduttu [MRV technologies].



### 5.3 Liikuteltavat soihdut

Liikuteltavia soihtuja käytetään kaasujärjestelmien tyhjennykseen. Sen etuna ulospuhallukseen on soihtutuksen pienempi ympäristövaikutus, koska metaania ei päästetä ilmakehään vaan se poltetaan hallitusti. Viime vuosikymmenen aikana soihtuvalmistajat ovat keskittyneet enemmän liikuteltavien soihtujärjestelmien kehitykseen. Yksi syy siihen on, että liikuteltavat soihtujärjestelmät sopivat muun muassa kaasusäiliöiden tyhjennykseen, kaatopaikoilla syntyvien jätekaasujen käsittelyyn sekä putkijärjestelmien tyhjennykseen. [Huomo 2013.]



Kuva 10. Liikuteltava soihtu Mobileflare LTC 2,0 [Hegemann 2013].

Liikuteltavien soihtujärjestelmien fyysiset koot ja polttotehot vaihtelevat tarkoituksen mukaan. Markkinoilta löytyy teholtaan muutamista kilowateista aina kymmeneen megawattiin saakka. Esimerkiksi kuvassa 11 on C-deg-yrityksen valmistama soihtu. Yrityksen pienin kymmenen kilowatin soihtu pystyy käsittelemään puhdasta maakaasua 1 m<sup>3</sup>/h ja suurin 55 MW:n soihtu jopa 5500 m<sup>3</sup>/h. Täydellä teholla toimiva soihtu tuottaa keskimäärin 75 dB(A):n äänitehon kymmenen metrin päässä tarkasteltuna ja sen tuottaman lämpösäteilyn vuoksi turvaetäisyys on 10–15 metriä soihdusta. [Hegemann 2013.]



Kuva 11. Liikuteltava soihtu HTC 1,5 [Hegemann 2013].

Kehittyneimpien soihtujärjestelmien ohjausyksikköihin on mahdollista sisällyttää useita soihtuja, jolloin polttokapasiteetti kasvaa. Tällaiset soihtujärjestelmät voivat olla peräkärryyn kiinnitettyjä kokonaisuuksia ja niitä voidaan hinata auton perässä. Isompitehoisten soihtujen liikuttamiseen paikasta toiseen vaaditaan raskaampaa kalustoa ja nosturia. Niiden lisäksi soihtuille täytyy valaa perustus, johon se kiinnitetään. [Hegemann 2013.]

Liikuteltavat soihtujärjestelmät suunnitellaan ja kootaan asiakkaan toiveiden mukaisesti. Suunnittelussa otetaan huomioon muun muassa tarvittavien paineensäätimien määrät, tarvittava polttoteho, liitännät maakaasuputkeen ja ne valmistaan yksikkönä. Soihtun kustannukset riippuvat pääasiassa polttotehon suuruudesta ja lisäjärjestelmistä, kuten lisäpolttimien tai melunrajoittimien tarpeesta. Esimerkiksi pienen 100 kW:n soihtun hinta on noin 35 000 € ja 10 MW:n hinta kohoaa 150 000-200 000 €:oon. [Hegemann 2013.]

#### 5.4 Soihtun komponentit

##### 5.4.1 Soihtun suunnittelu

Soihtujärjestelmän suunnittelu riippuu käyttökohteeseen soveltuvan soihtutyypin valinnalla. Soihtujärjestelmä sisältää ainakin pääkomponentit: poltin, tukirakenne, putkistot

sekä apulaitteet. Poltin sisältää yhden tai useamman pilot-liekin, pilot-sytyttimen ja pilot-liekintunnistimen. Soihtujärjestelmään voidaan myös lisätä valinnaisia komponentteja, jotka voivat parantaa tai laskea kustannuksia. Näitä komponentteja on esimerkiksi puhdistuksen vähennysjärjestelmä, jolla estetään ilman pääseminen soihdun kärjen kautta järjestelmään, nesteenerotussäiliö sekä vesilukkosäiliö. Mahdollisia apulaitteita ovat savuttoman polttojärjestelmän lisäksi puhaltimet, polton jaksotuslaitteisto tai tarkkailulaitteistot. [Bader ym. 2011: 2.]

Soihdun rakenne riippuu myös, millaisista lähteistä kaasu johdetaan soihtukaasuverkostoon sekä mitkä ovat poltettavan kaasun ominaisuudet: tilavuusvirta, koostumus, lämpötila ja painetaso. Sosiaaliset näkökulmat sekä turvallisuus- ja ympäristövaatimukset ovat tärkeitä suunnittelukriteereitä, joita ohjaavat säädökset, toiminnanharjoittajan toimintatavat sekä suunniteltavan soihdun läheisyydessä olevat yhteisöt. Järjestelmän mitoituksessa tulee ottaa huomioon varoventtiilit, jotka ovat yhteydessä soihtukaasuverkostoon. Kunkin varoventtiilin aiheuttama painehäviö soihdun kärjessä ei saa ylittää sallittua varoventtiilin vastapainetta järjestelmän virtausolosuhteissa. Tavanomaisilla varoventtiileillä sallittu vastapaine onkin yleensä rajoitettu 10 %:iin alimmasta alkupään varoventtiilin asetuspainesta. [Bader ym. 2011: 2.]

Ilman suodattuminen soihtujärjestelmään voi johtaa liekin takaisinlyöntiin (flashback), joka pahimmassa tapauksessa voi johtaa vakavaan onnettomuuteen. Soihdun poltto-liekin takaisinlyönti tarkoittaa soihdun kärjen toimintahäiriötä, joka tulisi selvittää ja korjata pian. Ilma voi päästä soihtujärjestelmään useaa eri reittiä: soihtutornin huipulla tapahtuvan palamisen aiheuttaman nosteen kautta, tuulen vaikutuksesta tai palamiskaasujen jäähtymisen vuoksi. Syyt voivat olla myös rakenteissa, kuten vuotavissa liitännöissä. [Bader ym. 2011: 3.]

Puhdistuskaasun määrän mitoitus käytettävässä soihtujärjestelmässä riippuu soihdun koosta ja rakenteesta. Sen käytöllä estetään muun muassa ilman pääsy järjestelmään, ja sillä voidaan tyhjentää järjestelmä haitallisista kaasujäämistä ulospuhalluksen tai äkillisen varoventtiilin laukeamisen vuoksi. Puhdistuskaasuna käytetään yleensä inerttiä tyyppikaasua ( $N_2$ ). Yleisesti voidaan todeta, mitä alhaisempi tiheys kaasulla soihtutornissa on, sitä enemmän puhdistuskaasua vaaditaan järjestelmän turvalliseen kunnossapitoon. Puhdistuskaasun käyttöä voidaan vähentää käyttämällä lisälaitteita: nopeus- tai nostetiivistettä. Ne toimivat takaisinvirtausta rajoittavina elementteinä soihtu-

tornin sisäpuolella ja niiden käyttö riippuu prosessin käyttöolosuhteista. [Bader ym. 2011: 3.]

#### 5.4.2 Ympäristön huomioiminen

Maakaasua poltettaessa syntyy lämpöä, joka siirtyy lämpösäteilynä ympäristöön. Soihdun suunnitteluvaiheessa otetaan huomioon lämpösäteilyn määrä ja raja-arvot, joiden perusteella määritellään soihdun korkeus ja sitä ympäröivä turva-alue. Jos soihdunjärjestelmää suunnitellaan alueelle, jossa on hyvin niukasti tilaa, niin edellä mainittujen kriteereiden täyttämiseksi soihdun kustannukset voivat nousta merkittävästi. Esimerkiksi soihdutornin korkeuden lisääminen kymmenellä metrillä lisää hintaa jopa 15000 €:lla. Soihdutorneihin voidaan asentamaan vesisuihkut polttimen läheisyyteen lämpösäteilyn hillitsemiseksi, mutta tekniikkaa käytetään lähinnä öljynporauslautoilla. [Bader ym. 2011: 3.]

Savuton poltto saadaan aikaiseksi, kun poltettava kaasu ja apukaasut ohjataan soihdun polttimeen, jossa kaasujen muodostama liikemäärä purkautuu ulos sekoittuen ympäröivään ilmamäärään. Liikemäärän, tai toisin sanoen, paineen hallinta on merkittävä tekijänä soihdun toiminnassa. Joissain tapauksissa soihdun on voitua suunnitella niin suurille virtauksille, että useampaa polttosuutinta ei tarvita. Pienille painetasoille tai pienille virtausmäärille suunniteltavat soihduratkaisut toteutetaan yleensä multi-point-järjestelminä, jos kaasujen liikemäärien suuruudet itsessään eivät sovellu savuttomaan polttoon. [Bader ym. 2011: 3.]

Höyryavusteiset soihdut ovat hyötysuhteeltaan parempia saavuttamaan savutonta polttoa verrattuna ilma-avusteisiin. Se johtuu korkeapaineisen höyryn kyvystä varastoida itseensä enemmän liikemäärää kuin pelkkä paineistettu ilma, joka parantaa ilman sekä polttokaasun sekoitusta parantaen suorituskykyä. Höyrynsyöttö voidaan toteuttaa asentamalla rei'itetystä putkesta taivutettu kehä soihdutornin yläosaan soihdun kärjen ympärille, josta höyryä lisätään tornin sisäpuolelle sekä kärjen läheisyyteen. [Bader ym. 2011: 3.]

Ilma-avusteinen soihdunjärjestelmä on hyvä vaihtoehto, jos höyryä ei ole saatavilla tai poltettavan kaasun painetaso on alhainen savuttoman polton toteuttamiseen. Tässä apujärjestelmässä ilmavirtaa kiihdytetään puhaltimen avulla soihdun kärkeen, joka on suunniteltu parantamaan ilman ja polttokaasun sekoitussuhdetta ja vakaata palamis-

prosessia. Lisäilman käyttö lisää kaasujen liikemäärää ja samalla vähentää stoikiometrisen ilman tarvetta 15–50 %. [Bader ym. 2011: 3.]

Avustamattomassa soihdussa palamisilma sekoittuu korkeapaineisen polttokaasun purkautuessa ulos soihdun kärjestä saavuttaen savuttoman polton. Tässä soihtutyypissä käytetään yleensä multi-point-järjestelmää tehokkuuden parantamiseksi. Tyypillisesti painetaso avustamattomassa soihdussa on joko 2,08 bara tai enemmän, jolloin erillisiä apujärjestelmiä ei tarvita. Jos avustamaton soihtujärjestelmä suunnitellaan käyttötarkoitukseen sopivaksi, sen avulla voidaan käsitellä korkeapaineisia kaasuvirtoja kustannustehokkaasti. Ympäristönäkökulmasta tarkasteltuna soihtujen toiminnassa polttokaasun ja palamisilman sekoitusnopeus on hyvinkin merkittävässä roolissa, kun puhutaan soihtujärjestelmien polttohyötysuhteesta. Ympäristösäädökset ja lait vaativat soihtujärjestelmien hyötysuhteen olevan 98 % tai yli. Se kuitenkin edellyttää apujärjestelmien käyttöönottoa ja niiden suhteuttamista poltettavan kaasun määrän. [Bader ym. 2011: 4.]

#### 5.4.3 Sytytys- ja tarkkailujärjestelmät

Luotettava sytytysjärjestelmä on yksi tärkeimmistä soihdun kärjen toimintaan liittyvistä turvallisuustekijöistä. Pilot-järjestelmä tarkkailee polttokaasun ja ilman määrää, sekoittaa ne, muokkaa polttoliekin haluttuun muotoon ja ylläpitää sen vakautta. Tyypillinen pilot-järjestelmä koostuu neljästä osasta: sekoittajasta tai venturiputkesta, kuristusaukosta, virtausputkesta, joka yhdistää sekoittajan ja kärjen, sekä kärjestä. Pilot-liekki synnyttää oikein toimiessaan lämpöä, ionisoitua kaasua, valoa ja ääntä. [Bader ym. 2011: 5.]

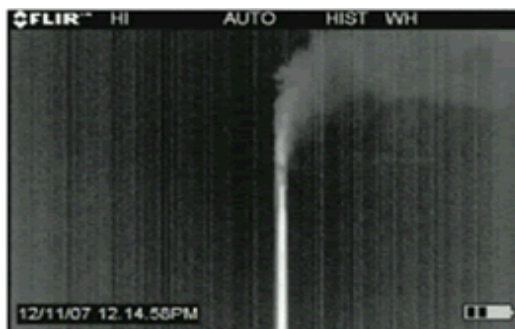
Sisäänrakennettu sytytysjärjestelmä sisältää yhden tai useamman pilot-sytyttimen, pilot-liekin tarkkailijan sekä polttoliekin vakautta ylläpitäviä toimintoja. Käytännössä pilot-liekkien määrä riippuu polttimen tyypistä ja koosta. Soihdun pilot-liekit on yleensä esisekoitustyyppiä, joka tarkoittaa että palamisilma ja pilot-kaasu sekoitetaan etäällä soihdun polttimesta. Esisekoitettu kaasu virtaa putkea pitkin pilot-liekillä, jolloin polttimen toiminta ei häiritse sen toimintaa. Sade tai kova tuuli ei heikennä tämän tyyppisen pilotin toimintaa ja markkinoilta löytyy malleja, jotka toimivat jopa tuulenopeudella 67 m/s. [Bader ym. 2011: 5.]

Liekin tunnistukseen on monia eri tapoja, joista lämpötilan mittaus pilotin kärjestä termoelementtien avulla on yleisimmin käytetty. Elementit on kytketty lämpötilakytkimeen

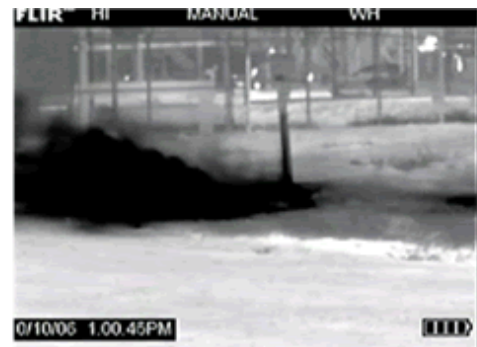
tai liekintunnistusjärjestelmään, joka liekin lämpötilan alentuessa ilmoittaa häiriöstä. Niiden käyttöikää rajoittaa huomattavasti käyttöympäristön laatu. [Bader ym. 2011: 6.]

Ionisaattorianturilla mitataan palamisessa syntyviä ionisoituneita kaasuja. Palamisprosessissa sähköisesti varautuneet ionit kulkeutuvat anturille ja muodostavat suljetun virtapiirin. Liekin palaessa virtapiirissä on virta, ja järjestelmä toimii silloin normaalisti. Mutta jos liekki sammuu, niin virtapiirissä kulkeva virta katoaa. Automaattinen järjestelmä tunnistaa liekin sammumisen ja sytyttää sen uudelleen. [Bader ym. 2011: 6.]

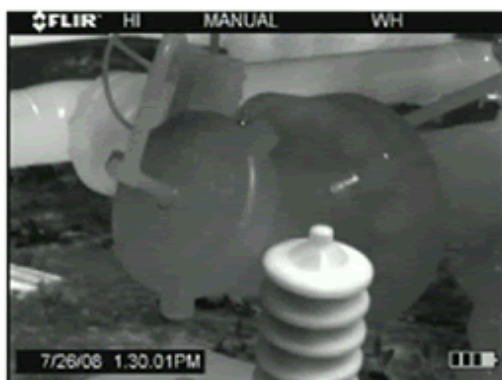
Pilot-liekkiä voidaan tarkkailla emittoituvan säteilyenergian määrän perusteella, koska liekin palaessa syntyy näkyvää valoa sekä infrapunasäteilyä. Kuvassa 13 on esimerkkikuvia tarkkailuun käytetyn infrapunakameran löytämiä vuotoja. Erikoisvalmisteinen infrapunakamera sijoitetaan soihutornin läheisyyteen maan tasalle. Optiset menetelmien käyttöä rajoittaa useasti näkyvyyttä heikentävät tai vääristävät tapahtumat, kuten kova vesisade, usva tai lumisade. Lisäksi ne eivät erota pilot-liekkiä ja polttimeen liekkiä toisistaan. [Bader ym. 2011: 6.]



Dump Valve Emissions



CH4 Pipeline Ground Leak



Pig Trap Leakage



Elec. Circuit Brkr SF6 Leak

Kuva 12. Infrapunakameralla kuvattuja kaasuvuotoja [Ed Kochanek 2013].

Ääneen perustuva tarkkailujärjestelmä koostuu niin kutsutusta sytytyslinjasta, joka kuljettaa äänen pilotilta herkille sensoreille. Sensorit tunnistavat tietyn taajuuden, mikä syntyy pilotti-liekin palaessa. Tieto kulkee sensoreilta signaaliprosessorille, joka analysoi akustista tietoa ja sen perusteella tunnistaa liekin tilan. Tämä tarkkailujärjestelmä on luotettava ja se osaa esimerkiksi erottaa pilot-liekit, höyrynsyötön sekä soihdun polttimen lähellä sijaitsevista äänilähteistä. Akustisen järjestelmän toiminta ei häiriinny sääolosuhteiden muuttuessa. [Bader ym. 2011: 6.]

## 5.5 Ulospuhallus

Tuuletustoimenpiteellä, tai ulospuhalluksella, tarkoitetaan yleensä kaasujen, kuten maakaasun tai muiden hiilivetyjen, hallittua vapauttamista ilmakehään öljyn ja kaasun tuotanto-, kuljetus- sekä kunnossapitotoimenpiteissä. Maakaasun lisäksi voidaan tuulettaa esimerkiksi vesihöyryä tai hiilidioksidia, joita syntyy eri tuotantoprosessien sivutuotteena. [Blowdown Protocol for Pipeline Systems 2011: 1-2]

Aluksi tyhjennettävä maakaasuputkiosio eristetään sulkemalla linjasulkuventtiilit. Maakaasuputken tuuletustoimenpiteessä syntyy melua, joka johtuu kymmeniin baareihin paineistetun maakaasun purkautuessa ulos putkesta ilmakehän paineeseen. Keskimäärin ulospuhalluksen ensimmäiset 30–60 minuuttia ovat meluisimmat, mutta paineen laskiessa melu vähenee ja loppuu kun putken sisäpaine on saavuttanut ilmanpaineen tason. Koko prosessi voi kestää tunteja, jopa päiviä, riippuen tyhjennettävän putkiosuuden pituudesta. Putkeen jäävät ilmanpaineen saavuttaneet kaasumäärät voidaan poistaa pumppaamalla inerttikaasua putkeen ja päästämällä se korkeapaineisena ulos, jolloin syntyy taas hieman melua. [Blowdown notification. 2005: 1–2.]

## 5.6 Komprimointi

Vaihtoehtona ulospuhalluksen ja soihdutuksen vähentämiseksi voidaan käyttää maakaasun komprimointia, joko putkesta toiseen tai siirtämällä sitä tyhjennettävästä putkiosuudesta eteenpäin. Kompessoriasemien operaattorit voivat alentaa putkessa virtaavan kaasun painetta säätämällä kompressorien painesuhdetta. Painetta voidaan myös laskea liikuteltavien kompressoriyksiköiden avulla. Kompessoriaseman ja liiku-

teltavien yksiköiden yhteiskäytöllä maakaasuputki saadaan tyhjennettyä lähes 95-prosenttisesti samalla metaani- ja hiilidioksidipäästöt alenevat, koska koko putkiosuutta ei pidä ulospuhaltaa tai soihduttaa. [Using Pipeline Pump-Down Techniques To Lower Gas Line Pressure Before Maintenance 2006: 1–2.]



Kuva 13. Esimerkki liikuteltavasta kompressoriyksiköstä [Transmission 2009: 16].

Liikuteltava kompressoriyksikkö on täysin omavarainen, sillä se voi käyttää polttoaineena siirrettävän putkiosuuden sisältämää maakaasua. Käyttämällä liikuteltavia kompressoriyksiköitä maakaasua ei mene hukkaan ja putkesta talteen otettu sisältö voidaan myydä asiakkaalle.

[LMF develops mobile compressor unit to transfer natural gas from pipelines 2012.]

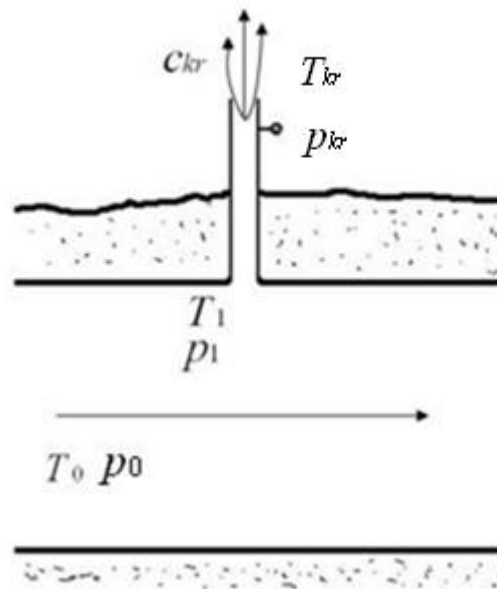
Markkinoilla on kompressoriyksiköitä, jotka on varustettu kaksivaiheisilla mäntäkompressoreilla. Kaksivaiheisen kompressorin avulla päästään 70 baarista linjasulkuventtiileillä suljetun maakaasuputken minimikäyttöpaineeseen saakka. Kompressoriyksikkö on kokonaisuus, johon on integroitu kerääjäsäiliö äkillisten paineenmuutosten kompensoimiseksi, lämpötilasäätimet, melunvaimentimet ja palonestojärjestelmä. Kompressoriyksiköissä on sisäänrakennettu maakaasuputkien puhdistusjärjestelmä. [LMF develops mobile compressor unit to transfer natural gas from pipelines 2012; Transmission 2009: 116.]



## 6 Laskelmat

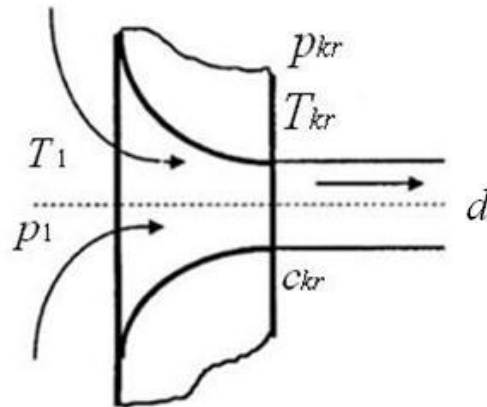
### 6.1 Putken tyhjentymisen yksinkertainen mallinnus

Mallinnuksen lähtökohtana on kuvan **14** kaltainen maan alla sijaitseva maakaasuputki, josta kaasu purkautuu halkaisijaltaan pienemmän ulospuhallusputken kautta ulos ilmanpaineeseen. Maakaasuputken halkaisijan koko on merkittävästi suurempi verrattuna ulospuhallusputkeen. Ulospuhallusputkea käsitellään laskuissa häviöttömänä suppenevana suuttimena, maakaasun moolimassana käytetään metaanin moolimassaa  $M$   $16,04 \text{ kg/mol} \cdot 10^3$  ja ominaislämpökapasiteettia  $c_p$   $0,0831451 \text{ bar} \cdot \text{dm}^3 / \text{mol} \cdot \text{K}$ , arvoja pidetään laskemisen aikana vakioina.



Kuva 14. Putken tyhjenystä havainnollistava tilanne.

Putken alkulämpötila  $T_0$  on alussa  $283,15 \text{ K}$  ja paine  $54 \text{ bara}$ . Paine putkessa laskee ulospuhalluksen seurauksena painetasoon  $p_1$ . Lämpötila  $T_1$  voidaan määrittää isentrooppisen tilanmuutoksen yhtälöllä ennen suutinta, kun kaasu jäähtyy ja laajenee paineen aletessa. Kuvassa **15** havainnollistetaan suppenevan suuttimen laskuissa käytettäviä muuttujia.



Kuva 15. Suppeneva suutin, muokattu [Perttula 2000: 113].

Ientrooppisen tilanmuutoksen aiheuttama lämpötilan muutos ennen suutinta määritetään kaavasta 16 johtamalla.

$$\frac{T_0}{T_1} = \left( \frac{p_0}{p_1} \right)^{\left( \frac{\gamma-1}{\gamma} \right)} \quad (16)$$

$$T_1 = \frac{T_0}{\left( \frac{p_0}{p_1} \right)^{\frac{(\gamma-1)}{\gamma}}} \quad (17)$$

$$T_1 = \frac{283,15K}{\left( \frac{54bar}{27bar} \right)^{\frac{(1.32-1)}{1.32}}} = 239,353K \quad (18)$$

Häviöttömän suutinvirtauksen paine suuttimen kärjessä saadaan käyttämällä kriittisen painesuhteen kaavaa.

$$p_{kr} = p_1 \cdot 0,5 \quad (19)$$

$$p_{kr} = 27bar \cdot 0,5 = 13,5bar \quad (20)$$

Kriittinen lämpötila saadaan käyttämällä kriittistä painesuhdetta.

$$\frac{T_{kr}}{T_1} = \left( \frac{p_{kr}}{p_1} \right)^{\left( \frac{\gamma-1}{\gamma} \right)} \quad (21)$$

$$T_{kr} = \frac{T_0}{\left( \frac{p_0}{p_{kr}} \right)^{\frac{(\gamma-1)}{\gamma}}} \quad (22)$$

$$T_1 = \frac{239,353}{\left( \frac{27\text{bar}}{13,5\text{bar}} \right)^{\frac{(1,32-1)}{1,32}}} = 202,331\text{K} \quad (23)$$

Kriittisen lämpötilan ja ominaislämpökapasiteettien avulla ratkaistaan ensin entalpiat ja sen jälkeen kriittinen nopeus suuttimen kärjessä, koska lämpöenergia muuttuu liike-energiaksi purkausaukossa.

$$h_1 = c_p \cdot T_1 \quad (24)$$

$$h_{kr} = c_p \cdot T_{kr} \quad (25)$$

$$\frac{c_{kr}^2}{2} = h_1 - h_{kr} \quad (26)$$

$$\frac{c_{kr}^2}{2} = c_p \cdot (T_1 - T_{kr}) \quad (27)$$

$$c_{kr}^2 = 2 \cdot c_p \cdot (T_1 - T_{kr}) \quad (28)$$

$$c_{kr} = \sqrt{(2 \cdot c_p \cdot (T_1 - T_{kr}))} \quad (29)$$

$$c_{kr} = \sqrt{\left[ 2 \cdot (2,19 \cdot 10^3) \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot (239,353 - 202,485) \text{K} \right]} = 401,848 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (30)$$

Virtaavalle kaasulle voidaan määrittää tiheys ja massavirran suurin suuttimen läpi.

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (31)$$

$$n = \frac{m}{M} \quad (32)$$

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (33)$$

$$p_{kr} \cdot V = n \cdot R \cdot T_{kr} \quad (34)$$

$$p_{kr} \cdot V = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T_{kr} \quad (35)$$

$$\frac{m}{V} = \frac{p_{kr} \cdot M}{R \cdot T_{kr}} \quad (37)$$

$$\rho_{CH_4} = \frac{p_{kr} \cdot M}{R \cdot T_{kr}} \quad (38)$$

$$\rho_{CH_4} = \frac{\left[ 13,5 \text{bar} \cdot 16,04 \left( \frac{\text{kg}}{\text{mol} \cdot 10^3} \right) \right]}{0,0831451 \left( \frac{\text{bar} \cdot \text{dm}^3}{\text{mol} \cdot \text{K}} \right) \cdot 202,485 \text{K}} = 12,862 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (39)$$

Häviöttömän suuttimen massavirta määritetään kriittisen nopeuden, tiheyden ja purkausaukon pinta-alan perusteella, halkaisija  $d$  on valittu mielivaltaisesti.

$$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (40)$$

$$A = \frac{\pi \cdot (0,025m)^2}{4} \quad (41)$$

$$A = \frac{\pi \cdot (0,025m)^2}{4} = (4,909 \cdot 10^{-4})m^2 \quad (42)$$

$$q_m = c_{kr} \cdot \rho_{CH_4} \cdot A \quad (43)$$

$$q_m = 401,848 \frac{m}{s} \cdot 12,862 \frac{kg}{m^3} \cdot (4,909 \cdot 10^{-4})m^2 = 2.537 \frac{kg}{s} \quad (44)$$

Laskuista (liite 1) saadut tulokset on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Putken mallinnuksesta saadut tulokset

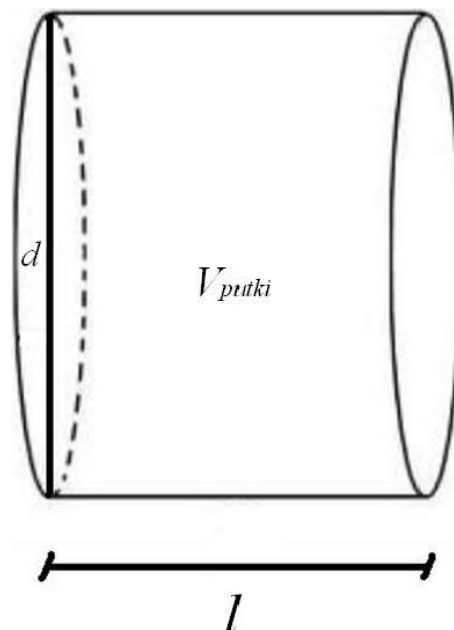
Paine alkutilassa	Paine ennen suutinta	Paine suuttimen kärjessä	Putken sisälämpötila alkutilassa	Lämpötila isentrooppisen tilanmuutoksen jälkeen	Kriittinen lämpötila suuttimen kärjessä	Kriittinen nopeus suuttimen kärjessä	Kaasun tiheys	Massavirta
$p_0$ [bara]	$p_1$ [bara]	$p_2$ [bara]	$T_0$ [°K]	$T_1$ [°K]	$T_{kr}$ [°K]	$c_{kr}$ [m/s]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$q_m$ [kg/s]
54,0	27,0	13,5	283,150	239,353	202,331	401,848	12,862	2,537
27,0	13,5	6,75	239,353	202,331	171,035	370,238	7,614	1,384
13,5	6,75	3,375	202,331	171,035	144,580	340,401	4,503	1,384
54,0	2,0	1,0	283,150	127,356	107,657	293,737	3,584	0,517
54,0	1,5	1,0	283,150	118,177	107,657	220,693	1,792	0,194

Taulukon 3 arvoista voidaan huomata, että putken tyhjentyessä syntyy äänennopeus kriittisen painesuhteen perusteella purkausaukossa ja paine laskee putken sisällä. Paineen laskun vuoksi sisällä virtaava kaasu alkaa jäähtyä ja laajentua isentrooppisen tilanmuutoksen yhtälön kautta useisiin kymmeneen celsius pakkasasteisiin. Paine-erot

häviöttömän suuttimen kärjen ja ympäristön kanssa on huomattavia, niin virtaus on aluksi hyvin voimakasta ja pyörteistä. Mutta paine-erojen tasaantuessa virtaus tasaantuu ja kaasu virtaa lähes suoraviivaisesti ulos putkesta.

## 6.2 Putkessa olevan metaanin määrittäminen

Putken sisältämän kaasun tilavuuden määrittämiseksi lasketaan kuvan **16** mukaisen ontton kappaleen tilavuus, johon käytetään sylinterin muotoisen kappaleen tilavuuskaavaa.



Kuva 16. Putkiosion tilavuuden määrittäminen

Putken tilavuus saadaan laskemalla ympyrän halkaisija, joka kerrotaan putkiosion pituudella.

$$V_{putki} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot l \quad (45)$$

$$V_{putki} = \frac{\pi \cdot (0,2151m)^2}{4} \cdot 5000m = 181,964m^3 \quad (46)$$

Putken sisältämän kaasun tilavuus saadaan määritettyä ideaalikaasun tilanyhtälöllä, käyttämällä putkessa vallitsevia arvoja sekä NTP-arvoja, eli lämpötila  $T_2$  on 273,15 K ja paine  $p_2$  on ilmanpaine.

$$\frac{p \cdot V}{T} = \text{vakio} \quad (47)$$

$$\frac{p_1 \cdot V_{\text{putki}}}{T_{\text{putki}}} = \frac{p_2 \cdot V_{n\_CH4}}{T_2} \quad (48)$$

$$V_{n\_CH4} = \frac{T_2 \cdot p_1 \cdot V_{\text{putki}}}{T_{\text{putki}} \cdot p_2} \quad (49)$$

$$V_{n\_CH4} = \frac{273,15K \cdot 54bar \cdot 181,694m^3}{283,15K \cdot 1,01325bar} = 9341m^3 \quad (50)$$

Kun putken sisältämän metaanin tilavuus on ratkaistu, voidaan laskea, kuinka paljon energiaa vapautuu sen palaessa kokonaan. Laskuissa on käytetty metaanin alempaa lämpöarvoa ja energiamäärä on muutettu megajouleiksi yksinkertaisen laskutoimituksen avulla.

$$H_{\text{tehollinen}} = 36 \frac{MJ}{m^3} \quad (51)$$

$$E_{CH4} = H_{\text{tehollinen}} \cdot V_{n\_CH4} \quad (52)$$

$$E_{CH4} = 36 \frac{MJ}{m^3} \cdot 9341m^3 = 336300MJ \quad (53)$$

$$1J = (2,77778 \cdot 10^{-7}) kWh \quad (54)$$

$$Q_{CH4} = E_{CH4} \cdot (2,77778 \cdot 10^{-7}) kWh \quad (55)$$

$$Q_{CH_4} = (2,77778 \cdot 10^{-7}) \cdot (3,363 \cdot 10^{11}) = 93,42 MWh \quad (56)$$

Kun soihdun teho on tiedossa, voidaan laskea karkeasti, kuinka kauan kestää polttaa 9431 m<sup>3</sup> metaania 3 MW:n soihdulla.

$$P_{soihdu} = \frac{Q_{CH_4}}{t} \quad (57)$$

$$t = \frac{Q_{CH_4}}{P_{soihdu}} \quad (58)$$

$$t = \frac{93,42 MWh}{3 MW} \approx 31 h \quad (59)$$

Taulukossa 2 on esitetty liitteessä 2 olevien laskujen tuloksia.

Taulukko 4. Liitteen 2 sisältämien laskujen tulokset

Putken pituus	Putken tilavuus	Metaanin määrä putkessa @ NTP	Metaanin polttamisesta vapautuva lämpöteho	Soihduttamiseen kuluva aika 3 MW:n soihdulla
<b><i>l</i> [m]</b>	<b><i>V</i><sub>putki</sub> [m<sup>3</sup>]</b>	<b><i>V</i><sub>n,CH4</sub> [Nm<sup>3</sup>]</b>	<b><i>Q</i><sub>CH4</sub> [MW]</b>	<b><i>t</i> [h]</b>
5000	181,7	9341	93,42	31
10000	363,4	18680	186,81	62
15000	525,1	28020	280,28	93

Taulukossa 2 on esitetty liitteessä 2 olevien laskujen tuloksia. Yllä esitetyn esimerkin tarkoituksena on ollut karkeasti arvioida soihdutukseen kuluva aikaa, ja laskuissa on yksinkertaistettu soihdutustilannetta.



## 7 Yhteenveto

Tämän insinööriyön tarkoituksena oli laatia esiselvitys liikuteltavien soihdun käyttömahdollisuuksista *Gasum Oy:n* maakaasun siirtoverkostossa sekä esitellä vaihtoehtoja soihdutukselle. Yhteistyökumppanina toimi *Gasum Oy*, jolle selvitin liikuteltavien soihdun hintatasoa, tekniikkaa ja käytettävyyttä siirtoputkiston painetason ollessa 54 bara:a. Selvitin kansainvälisten ilmastopöytäkirjojen periaatteita ja päästökaupan toimintaa, joiden tarkoituksena on hillitä kasvihuonepäästöjä ja asettaa niille hinta. Selvisi, että metaanille ei ole vielä asetettu päästöhintaa, vaikka sen GWP-arvo on monikymmenkertainen verrattuna hiilidioksidiin.

Liikuteltavien soihdun käyttöönoton kannattavuutta perustelen yksinkertaistettujen laskelmien ja valmistajalta saamieni tietojen valossa. Laskelmien tuloksista voidaan päätellä, että liikuteltavien soihdun käyttöönotto tuo mukanaan suuria haasteita. Liikuteltavien soihdun käyttömahdollisuuksia siirtoverkon soihdutuksessa rajoittavat erittäin korkea hintataso sekä soihduttamiseen kuluva aika.

Liikuteltavia soihdun käsittelevän aineiston keruu osoittautui erittäin haastavaksi, koska yhtään suoraa lähdeviitettä ei aiheesta löytynyt. Onnistuin löytämään ainoastaan kiinteää soihdutusta käsitteleviä verkkolähteitä, joista kylläkin sain tietoa yleiseen soihdustekniikkaan liittyen. Liikuteltavien soihdun teoriaa yritin selvittää lähettämällä sähköposteja kolmelle eri valmistajalle: Yhdysvaltoihin, Iso-Britanniaan ja Saksaan. Tiedustelin sähköpostissa useita liikuteltaviin soihdun ja niiden tekniikkaan liittyviä asioita. Tärkeimpien kysymysten joukossa yritin selvittää löytyykö ko. valmistajalta liikuteltavaa soihdun, joka soveltuisi siirtoverkoston painetasoon. Kysyin liikuteltavan soihdun maksimitehoa sekä minkälaisia liitäntöjä se vaatisi, jotta se voitaisiin liittää siirtoverkoston. Lisäksi tiedustelin muun muassa meluntuottoa, turva-alueita ja luonnollisesti kustannuksia. Ainoa vastaus tuli Saksasta C-degiltä, jonka tuotteisiin kuuluvat muun muassa liikuteltavat soihdunjärjestelmät.

Laskuesimerkissä (liite 1) on esitetty isentrooppisen tilanmuutoksen ja häviöttömän suppenevan suuttimen yhtälöiden kautta maakaasuputken paineenlaskusta aiheutuvia muutoksia. Niistä käy ilmi kaasun lämpötilan lasku ja laajeneminen paineen alenemisesta johtuen. Laskuissa olen yksinkertaistanut ulosvirtausta, koska todellisen tilanteen mallintaminen matemaattisesti on erittäin hankalaa. Mallinnuksen tarkoituksena on esittää soihdun suunnittelun kannalta merkittäviä mekanismeja, jotta soihdun toimisi op-

timaalisesti kaikissa olosuhteissa. Valmistajan ehdottama kolmen megawatin polttotehoisen liikuteltavan soihdun hintataso on karkeasti arvioiden noin 70 000 euroa, jonka hintaa voi edelleen nostaa tarvittavat polton apujärjestelmät ja paineenalennuskomponentit. Soihdutukseen kuluvan ajan määrittämiseen käytin yksinkertaista mallinnusta. Sen sijaan todellisen soihdutusajan määrittämiseen tulisi käyttää siihen soveltuvia laskenta- ja mallinnusohjelmia.

Esimerkkilaskuissa (liite 2) esittelin karkeasti liikuteltavalta soihdulta kuluvaan aikaa putkiston tyhjennykseen, joka pelkästään viiden kilometrin matkalta kestäisi yli vuorokauden. Soihdutuksessa syntyvien hiilidioksidipäästöjen päästömaksut sekä poltetusta metaanista menetyt myyntitulot lisääisivät soihdutuskustannuksia huomattavasti, jolloin todellinen hintataso määrittyisi vasta käyttöönoton jälkeen.

Valmistajan sähköpostivastauksesta selvisi, että soihdutustehon tarpeen kasvaessa myös liikuteltavan soihdun fyysinen koko kasvaa. Kolmen megawatin soihdun kuljetukseen vaaditaan raskasta kalustoa, kuten nosturia ja kuorma-autoa. Kolmen megawatin liikuteltava soihtu tarvitsee soihdutuspaikan läheisyyteen myös kiinteän perustuksen, johon se voidaan kiinnittää toimenpiteen ajaksi. Perustuksia tulisi rakentaa lukuisia koko siirtoputkiston kattavalle alueelle. Huomasin, että kiinteiden perustuksien sijoittaminen sekä liitännät siirtoputkistoon vaatisivat mielestäni tarkkoja kannattavuuslaskelmia, jota en tässä esiselvityksessä tietoisesti lähtenyt kartoittamaan.

Soihdutukselle parhaaksi vaihtoehdoksi osoittautui komprimointi, koska sen tuottamat päästöt ovat suhteessa pienemmät verrattuna ulospuhallukseen tai soihdutukseen. Hakiessani tietoa komprimoinnista, kävi myös ilmi, että siitä syntyvät metaanipäästöt ovat erittäin alhaiset, eikä putken sisältöä mene hukkaan. Liikuteltavat kompressorisyksiköt kuitenkin maksavat huomattavasti enemmän kuin soihtuyskiköt.

Työn tulokset antavat suuntaa *Gasum Oy:lle* liikuteltavan soihdun mahdollisista kustannuksista sekä sen toiminnasta maakaasuputken tyhjentämisessä. Tämän esiselvityksen pohjalta yrityksellä on mahdollisuus harkita liikuteltavan soihdun käyttöönottoa. Jatkoselvitys siirtyy *Gasum Oy:lle*, jolloin he voivat halutessaan pyytää tarjouksia eri soihtuvalmistajilta. Tarjousten perusteella saadaan tarkempia arvioita hintatasosta ja tarvittavista muutoksista maakaasuverkostoon liittämistä.

Tulevana energia- ja ympäristötekniikan insinöörinä koen ajankohtaiseksi aiheeksi pohdita yritysten ympäristöeettisiä linjauksia. Tämä työ on herättänyt kysymyksiä itselleni muun muassa luonnonvarojen tuhlauksesta ja suurten energiayritysten yhteiskuntavastuusta. Toisaalta luonnonvarojen talteenotto ja päästöjen hillitseminen on yrityksille hyvin kallista. Kuitenkaan ympäristön suojelulle ei voida asettaa hintaa. Jos kustannuksia ei tarvitsisi ottaa huomioon, tämän selvityksen myötä tulisin siihen tulokseen, että esittelemistäni putkentyhjennysmenetelmistä komprimoiti olisi paras vaihtoehto päästöjen minimointiin ja yhteisen ympäristön vaalimiseen. Teknologian kehittyessä ja sitä kautta hyötysuhteiden parantuessa toivon, että ympäristökysymyksiin saataisiin pian konkreettisia vastauksia.

## 8 Lähteet

Bader, Adam. Baukal, Charles E. Bussman, Wes. 2011. Selecting the Proper Flare Systems. Verkkodokumentti. American Institute of Chemical Engineers. <<http://people.clarkson.edu/~wwilcox/Design/FlareSel.pdf>> 8.6.2013

Biogeochemistry and Budgets of Methane. 2007. Verkkodokumentti. IPCC. <[http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/wg1/en/ch7s7-4-1.html](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/ch7s7-4-1.html)> 16.7.2013

Bovet, Philippe. 2008. Ympäristöatlas nykytila ja tulevaisuus. Like Kustannus.

Gasum Imatra – maakaasun portti Suomeen. Verkkodokumentti. <[www.gasum.fi/tuotteet/maakaasu/Sivut/MatkaSuomeen.aspx](http://www.gasum.fi/tuotteet/maakaasu/Sivut/MatkaSuomeen.aspx)> Luettu 9.11.2013

Gasum kaasupörssi. Verkkodokumentti. <[www.gasum.fi/kaasuporssi/Sivut/default.aspx](http://www.gasum.fi/kaasuporssi/Sivut/default.aspx)> Luettu 1.7.2013

Gasum konsernin yritysvastuu. 2012. Verkkodokumentti. <[www.gasum.fi/vastuullisuus/Documents/Gasum\\_yritysvastuu2012\\_fin.pdf](http://www.gasum.fi/vastuullisuus/Documents/Gasum_yritysvastuu2012_fin.pdf)> Luettu 3.7.2013

Gasum maakaasun jakeluputkiston rakentaminen. 2010. Verkkodokumentti <[www.gasum.fi/kaasuverkostot/kehittaminen/Lempaala-Kangasala/Documents/Maakaasun\\_jakeluputkiston\\_rakentaminen\\_v2.pdf](http://www.gasum.fi/kaasuverkostot/kehittaminen/Lempaala-Kangasala/Documents/Maakaasun_jakeluputkiston_rakentaminen_v2.pdf)> Luettu 2.7.2013

Gasum maakaasun siirtoverkostot. Verkkodokumentti. <[www.gasum.fi/kaasuverkostot/siirto/Sivut/default.aspx](http://www.gasum.fi/kaasuverkostot/siirto/Sivut/default.aspx)> Luettu 3.7.2013

Gasum maakaasun tuotetiedote. Verkkojulkaisu. <[www.gasum.fi/tuotteet/maakaasu/Documents/Maakaasun\\_tuotetiedote.pdf](http://www.gasum.fi/tuotteet/maakaasu/Documents/Maakaasun_tuotetiedote.pdf)> Luettu 2.7.2013

Gasum yritysinfo. Verkkodokumentti. <[www.gasum.fi/yritysinfo/toihin/Sivut/Henkilostolukuina.aspx](http://www.gasum.fi/yritysinfo/toihin/Sivut/Henkilostolukuina.aspx)> Luettu 6.7.2013

Global Atmospheric Concentrations of Methane Over Time. 2013. Verkkodokumentti. United States Environmental Protection Agency. <<http://www.epa.gov/climatechange/science/indicators/ghg/ghg-concentrations.html>> Luettu 2.7.2013

Global Gas Flaring Reduction. 2013. Verkkodokumentti. The World Bank. <<http://web.worldbank.org/WBSITE/EXTERNAL/NEWS/0,,contentMDK:21032487~menuPK:34480~pagePK:64257043~piPK:437376~theSitePK:4607,00.html>> Luettu 24.9.2013

Energiamarkkinavirasto. Yleistä päästökaupoista. Verkkodokumentti.  
<<http://www.energiamarkkinavirasto.fi/default.asp>> Luettu 2.7.2013

Europa. 2011. Kioton pöytäkirja ilmastonmuutoksesta. Verkkodokumentti.  
<[http://europa.eu/legislation\\_summaries/environment/tackling\\_climate\\_change/l28060\\_fi.htm](http://europa.eu/legislation_summaries/environment/tackling_climate_change/l28060_fi.htm)> 2.7.2013

Global carbon-dioxide emissions increase by 1.0 Gt in 2011 to record high. 2012. Verkkodokumentti. International Energy Agency.  
< [www.iea.org/newsroomandevents/news/2012/may/name,27216,en.html](http://www.iea.org/newsroomandevents/news/2012/may/name,27216,en.html)> Luettu 6.8.2013

Hegemann, Joachim. 2013. Diplomi-insinööri, C-deg environmental engineering GmbH. Sähköpostikeskustelu 9.10.2013.

Hiilidioksidi ja hiilen kiertokulku. 2012. Verkkodokumentti. Ilmatieteenlaitos <[ilmasto-opas.fi/fi/ilmastonmuutos/ilmio/-/artikkeli/1e92115d-8938-48f2-8687-dc4e3068bdbd/hiilidioksidi-ja-hiilen-kiertokulku.html](http://ilmasto-opas.fi/fi/ilmastonmuutos/ilmio/-/artikkeli/1e92115d-8938-48f2-8687-dc4e3068bdbd/hiilidioksidi-ja-hiilen-kiertokulku.html)> Luettu 6.8.2013

Hiilidioksidipitoisuus ylittänyt Pallaksella 400 ppm:n tason. 2013. Verkkodokumentti. Ilmatieteenlaitos. <[www.ilmatieteenlaitos.fi/tiedotearkisto/-/journal\\_content/56/30106/658924?refererPlid=38137](http://www.ilmatieteenlaitos.fi/tiedotearkisto/-/journal_content/56/30106/658924?refererPlid=38137)>Luettu 6.8.2013

Huomo, Aki. 2013. Ympäristö- ja turvallisuuspäällikkö, Gasum Oy, Kouvola. Sähköpostikeskustelu 5.9.2013.

Ilmastonmuutokseen liittyvää sanastoa. Verkkodokumentti. <<http://energia.fi/energia-ja-ymparisto/ilmastonmuutos/ilmastonmuutokseen-liittyvaa-sanastoa>> Luettu 2.7.2013

IR Imaging Detects Storage Tank Emissions & Other Leaks. 2013. Verkkodokumentti. Ed Kochanek. < [http://www.irinfo.org/articles/1\\_1\\_2011\\_kochanek.html](http://www.irinfo.org/articles/1_1_2011_kochanek.html)> Luettu 8.6.2013

Blowdown notification. 2005. Verkkodokumentti. Trans Canada. Luettu 8.6.2013

<[http://www.transcanada.com/docs/Our\\_Responsibility/Blowdown\\_Notification\\_Factsheet.pdf](http://www.transcanada.com/docs/Our_Responsibility/Blowdown_Notification_Factsheet.pdf)> Luettu 8.6.2013

Kasvihuonekaasut lämmittävät. 2012 Verkkodokumentti. Ilmatieteenlaitos.  
<<https://ilmasto-opas.fi/fi/ilmastonmuutos/ilmio/-/artikkeli/3a576a6e-bec5-44bc-a01d-11497ebdc441/kasvihuonekaasut-lammittavat.html>> Luettu 2.7.2013

Kanerva, Jaakko. 2012. Päästökaupat. Verkkodokumentti. Helsinki: Aalto Yliopisto.  
<[www.google.fi/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=4&ved=0CD4QFjAD&url=https%3A%2F%2Fnoppa.aalto.fi%2Fnoppa%2Fkurssi%2Fmaa-29.3336%2Fmateriaali%2Fmaa-29\\_3336\\_paastokaupat\\_\\_2.pdf&ei=TmpdUvi1JYeO4wTMwoDABA&usq=AFQjCNFNrzi ru0wHjd9L7LyFt7Gytn1dCw&bvm=bv.53899372,d.bGE&cad=rja](https://www.google.fi/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=4&ved=0CD4QFjAD&url=https%3A%2F%2Fnoppa.aalto.fi%2Fnoppa%2Fkurssi%2Fmaa-29.3336%2Fmateriaali%2Fmaa-29_3336_paastokaupat__2.pdf&ei=TmpdUvi1JYeO4wTMwoDABA&usq=AFQjCNFNrzi ru0wHjd9L7LyFt7Gytn1dCw&bvm=bv.53899372,d.bGE&cad=rja)> Luettu 18.8.2013

Karjalainen, Mirja. Kasvihuoneilmiö. Verkkodokumentti.

<[www.kemi.fi/lukio/MirjaKarjalainen/yokemia/oheis/kasvihuone.html](http://www.kemi.fi/lukio/MirjaKarjalainen/yokemia/oheis/kasvihuone.html)> Luettu 2.7.2013

Kiotoon pöytäkirjan toimeenpanon säännöt. 2003 Verkkodokumentti. Ympäristöministeriö.

<[http://www.google.fi/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CCwQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.ym.fi%2Fdownload%2Fnoname%2F%257BF1CF964D-3FCB-45B5-9B80-502B391ED08A%257D%2F31349&ei=cl5-UtPsMuai4gS79YDQCA&usg=AFQjCNH3Nbr\\_BEISe\\_x635BOw-pAvup-Zg&bvm=bv.56146854,d.bGE](http://www.google.fi/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CCwQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.ym.fi%2Fdownload%2Fnoname%2F%257BF1CF964D-3FCB-45B5-9B80-502B391ED08A%257D%2F31349&ei=cl5-UtPsMuai4gS79YDQCA&usg=AFQjCNH3Nbr_BEISe_x635BOw-pAvup-Zg&bvm=bv.56146854,d.bGE)> Luettu 7.8.2013

Kiotoon pöytäkirja. 2013. Ympäristöministeriö. Verkkodokumentti <[http://www.ym.fi/fi-FI/Ymparisto/Ilmasto\\_ja\\_ilma/Ilmastonmuutoksen\\_hillitseminen/Kansainvaliset\\_ilmasto\\_neuvottelut/Kiotoon\\_poytakirja](http://www.ym.fi/fi-FI/Ymparisto/Ilmasto_ja_ilma/Ilmastonmuutoksen_hillitseminen/Kansainvaliset_ilmasto_neuvottelut/Kiotoon_poytakirja)> Luettu 7.8.2013

Klemola, Kimmo. 2013. Maakaasu. Verkkodokumentti. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. <[www3.lut.fi/webhotel/teke/ktp/2013/Maakaasu.pdf](http://www3.lut.fi/webhotel/teke/ktp/2013/Maakaasu.pdf)> Luettu 12.7.2013

Laurikka, Harri; Talsi, Tuija. 2013. Kiotoon pöytäkirja. Verkkodokumentti. Ympäristöministeriö. <[http://www.ym.fi/fi-FI/Ymparisto/Ilmasto\\_ja\\_ilma/Ilmastonmuutoksen\\_hillitseminen/Kansainvaliset\\_ilmasto\\_neuvottelut/Kiotoon\\_poytakirja](http://www.ym.fi/fi-FI/Ymparisto/Ilmasto_ja_ilma/Ilmastonmuutoksen_hillitseminen/Kansainvaliset_ilmasto_neuvottelut/Kiotoon_poytakirja)> Luettu 7.8.2013

Laurikka, Harri. 2013. Joustomekanismit. Verkkodokumentti. Ympäristöministeriö.

<[www.ym.fi/fi-FI/Ymparisto/Ilmasto\\_ja\\_ilma/Ilmastonmuutoksen\\_hillitseminen/Kansainvaliset\\_ilmasto\\_neuvottelut/Joustomekanismit\\_ja\\_keinot](http://www.ym.fi/fi-FI/Ymparisto/Ilmasto_ja_ilma/Ilmastonmuutoksen_hillitseminen/Kansainvaliset_ilmasto_neuvottelut/Joustomekanismit_ja_keinot)> Luettu 7.8.2013

LMF develops mobile compressor unit to transfer natural gas from pipeliness. 2012. Verkkodokumentti. LMF. <[www.lmf.at/LMF-Mobile-Compressor-Unit-to.1308.0.html](http://www.lmf.at/LMF-Mobile-Compressor-Unit-to.1308.0.html)> Luettu 19.9.2013

Mushrif Trading & Contracting Co. 2011. Verkkodokumentti.

<<http://www.mushrif.com/prodetails.aspx?pid=151>> Luettu 8.6.2013

MRV technologies. Verkkodokumentti. <[www.mrw-tech.com/pia\\_loading\\_terminal\\_flares\\_components.html](http://www.mrw-tech.com/pia_loading_terminal_flares_components.html)>

Luettu 8.6.2013

Perttula, Jarmo. 2000. Energiatekniikka. Porvoo: WSOY.

Prather, Michael. 2003 An Examination of Anthropogenic Climate Forcing in the 21st Century: Greenhouse Gases and Aerosols – Direct and Indirect. Verkkodokumentti. University of California at Irvine.

<[www.esto.nasa.gov/conferences/igarss03/papers/MO091500\\_Prather.pdf](http://www.esto.nasa.gov/conferences/igarss03/papers/MO091500_Prather.pdf)> Luettu 2.7.2013

Quaas, Johannes. Boucher, Olivier. Dufresne, Jean-Louis. Le Treut, Hervé. 2004. Impacts of greenhouse gases and aerosol direct and indirect effects on clouds and radia-

tion in atmospheric GCM simulations of the 1930-1989 period. Verkkodokumentti. France, Paris: Laboratoire de Météorologie Dynamique. <[www.lmd.jussieu.fr/~jldufres/publi/2004/Quaas.Boucher.ea-cdyn-2004.smi.pdf](http://www.lmd.jussieu.fr/~jldufres/publi/2004/Quaas.Boucher.ea-cdyn-2004.smi.pdf)> Luettu 2.7.2013

Recent Global Monthly Mean CO<sub>2</sub>. 2013. Verkkodokumentti. NOAA. <<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html>> Luettu 3.9.2013

Räisänen, Jouni. 2005. Ilmastonmuutos ja ilmastomallit. Verkkodokumentti. Helsingin yliopiston Fysikaalisten tieteiden laitos. <[www.operaatiotutkimus.fi/seminaarit/105/esitykset/raisanen.pdf](http://www.operaatiotutkimus.fi/seminaarit/105/esitykset/raisanen.pdf)> Luettu 4.8.2013

Sabine, Christopher L.; Feely Richard A. 2007. The Oceanic Sink for Carbon Dioxide. Verkkodokumentti. Pacific Marine Environmental Laboratory. <<http://www.pmel.noaa.gov/pubs/outstand/sabi2854/modern.shtml>> Luettu 12.10.2013

Solomon Susan, Qin Dahe, Manning Martin. 2007. A report accepted by Working Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change but not approved in detail. Verkkodokumentti. Intergovernmental panel on climate change. <[www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-ts.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-ts.pdf)> Luettu 12.10.2013

Suomen nielut. 2012. Verkkodokumentti. Ilmatieteenlaitos. <<http://ilmasto-opas.fi/fi/ilmastonmuutos/hillinta/-/artikkeli/68b988f9-b606-4425-95c7-2827205d9406/suomen-nielut.html>> Luettu 13.10.2013

Suomen kaasuyhdistys ry. 2008. Verkkodokumentti. <[www.maakaasu.fi/sites/default/files/pdf/kasikirja/kasikirja\\_20110307.pdf](http://www.maakaasu.fi/sites/default/files/pdf/kasikirja/kasikirja_20110307.pdf)> Luettu 1.7.2013

Termites as a Source of Atmospheric Methane. 1996. Verkkodokumentti. Greg Brockberg <<http://www.meteor.iastate.edu/gcp/studentpapers/1996/atmoschem/brockberg.html>> Luettu 26.6.2013

Toiviainen, Pasi. 2009. Ilmastonmuutos.Nyt. Helsinki: Otava. Luettu 18.6.2013

Transmission. 2009. Verkkodokumentti. IGU Working Committee. <<http://www.igu.org/html/wgc2009/committee/WOC3.pdf>> Luettu 31.8.2013

Using Pipeline Pump-Down Techniques To Lower Gas Line Pressure Before Maintenance. 2006. Verkkodokumentti. Natural Gas Star Partners. <[http://epa.gov/gasstar/documents/ll\\_pipeline.pdf](http://epa.gov/gasstar/documents/ll_pipeline.pdf)> Luettu

Yhä enemmän hiilidioksidia jää ilmaan. 2009. Verkkodokumentti. Tiede. <[http://www.tiede.fi/uutiset/3728/yha\\_enemman\\_hiilidioksidia\\_jaa\\_ilmaan](http://www.tiede.fi/uutiset/3728/yha_enemman_hiilidioksidia_jaa_ilmaan)> Luettu 21.1.2012.

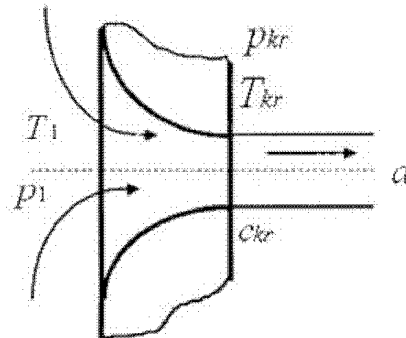
## Paineenalennuslaskut

Laskenta paineen laskiessa ulosvirtauksen takia 27 bara:an:

Absoluuttiset paineet:

$$p_0 := 54.0 \text{ bar}$$

$$p_1 := 27.0 \text{ bar}$$



Putken sisälämpötila alkutilassa:

$$T_0 := 283.15 \text{ K}$$

$$\gamma := 1.32$$

Putken sisälämpötila, kun paine laskee 54 baarista 27 baariin isentrooppisesti:

$$\frac{T_0}{T_1} = \left( \frac{p_0}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad T_1 = \frac{T_0}{\left( \frac{p_0}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \quad T_1 := \frac{283.15 \text{ K}}{\left( \frac{54 \text{ bar}}{27 \text{ bar}} \right)^{\frac{1.32-1}{1.32}}} \quad T_1 = 239.353 \text{ K}$$

Häviöttömän suutinvirtauksen loppulämpötila paineen laskiessa 27 bara:sta 13,5 bara:an:

Kriittinen painesuhde:  $\pi_{kr} = p_{kr} / p_1 = 0.5$

$$p_{kr} = p_1 \cdot 0.5$$

$$p_{kr} := 13.5 \text{ bar}$$

$$\frac{T_{kr}}{T_1} = \left( \frac{p_1}{p_{kr}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad T_{kr} = \frac{T_1}{\left( \frac{p_1}{p_{kr}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \quad T_{kr} := \frac{239.353 \text{ K}}{\left( \frac{27 \text{ bar}}{13.5 \text{ bar}} \right)^{\frac{1.32-1}{1.32}}} \quad T_{kr} = 202.331 \text{ K}$$



Suutinvirtauksen nopeus suuttimen lopussa entalpien avulla laskettuna:

$$h_1 = c_p \cdot T_1 \quad h_{kr} = c_p \cdot T_{kr}$$

Ominaislämpökapasiteetti pidetään vakiona, koska kyseessä on tarkoitus vain havainnollistaa kaasun toimintaa suuttimessa.

$$h_1 = h_{kr} + \frac{c_{kr}^2}{2}$$

$$\frac{c_{kr}^2}{2} = h_1 - h_{kr}$$

$$c_p := (2.19 \cdot 10^3) \frac{J}{kg \cdot K}$$

$$1 J = 1 kg \cdot m^2/s^2$$

$$\frac{c_{kr}^2}{2} = (c_p \cdot T_1) - (c_p \cdot T_{kr})$$

$$c_{kr}^2 = 2 \cdot c_p \cdot (T_1 - T_{kr})$$

$$c_{kr} = \sqrt{2 \cdot c_p \cdot (T_1 - T_{kr})}$$

$$c_{kr} = \sqrt{\left(2 \cdot (2.19 \cdot 10^3) \frac{J}{kg \cdot K} \cdot (239.353 - 202.485) K\right)}$$

$$c_{kr} = 401.848 \frac{m}{s}$$

Virtaavan kaasun tiheys:

$$R := 0.0831451 \frac{bar \cdot L}{mol \cdot K}$$

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad n = \frac{m}{M} \quad \rho = \frac{m}{V}$$

$$p \cdot V = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T$$

$$M := 16.04 \frac{kg}{mol \cdot 10^3}$$

$$p \cdot V \cdot M = m \cdot R \cdot T$$

$$\frac{m}{V} = \frac{p \cdot M}{R \cdot T}$$

$$\rho = \frac{p \cdot M}{R \cdot T}$$

$$\rho_{CH_4} = \frac{p_{kr} \cdot M}{R \cdot T_{kr}}$$

$$\rho_{CH_4} := \frac{\left(13.5 \text{ bar} \cdot 16.04 \frac{\text{kg}}{\text{mol} \cdot 10^3}\right)}{0.0831451 \frac{\text{bar} \cdot \text{L}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \cdot 202.485 \text{ K}}$$

$$\rho_{CH_4} = 12.862 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Häviöttämän suuttimen läpi kulkeva massavirta:

$$d := 0.025 \text{ m}$$

$$A := \frac{(\pi \cdot d^2)}{4}$$

$$A = (4.909 \cdot 10^{-4}) \text{ m}^2$$

$$q_m = c_{cr} \cdot \rho_{CH_4} \cdot A \quad q_m := 401.848 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 12.862 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot (4.909 \cdot 10^{-4}) \text{ m}^2$$

$$q_m = 2.537 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Laskenta paineen laskiessa ulosvirtauksen takia 13.5 bara:an:

Absoluuttiset paineet:

$$p_0 := 27.0 \text{ bar}$$

$$p_1 := 13.5 \text{ bar}$$

Putken sisälämpötila alkutilassa:

$$T_0 := 239.353 \text{ K}$$

$$\gamma := 1.32$$

Putken sisälämpötila, kun paine laskee 27 baarista 13.5 baariin isentrooppisesti:

$$\frac{T_0}{T_1} = \left( \frac{p_0}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad T_1 = \frac{T_0}{\left( \frac{p_0}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \quad T_1 := \frac{239.353 \text{ K}}{\left( \frac{27 \text{ bar}}{13.5 \text{ bar}} \right)^{\frac{1.32-1}{1.32}}} \quad T_1 = 202.331 \text{ K}$$

Häviöttömän suutinvirtauksen loppulämpötila paineen laskiessa 13.5 bara:sta 6.75bara:an:

Kriittinen painesuhde:  $\pi_{kr} = p_{kr} / p_1 = 0.5$

$$p_{kr} = p_1 \cdot 0.5$$

$$p_{kr} := 6.75 \text{ bar}$$

$$\frac{T_{kr}}{T_1} = \left( \frac{p_1}{p_{kr}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad T_{kr} = \frac{T_1}{\left( \frac{p_1}{p_{kr}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \quad T_{kr} := \frac{202.331 \text{ K}}{\left( \frac{13.5 \text{ bar}}{6.75 \text{ bar}} \right)^{\frac{1.32-1}{1.32}}} \quad T_{kr} = 171.035 \text{ K}$$

Suutinvirtauksen nopeus suuttimen lopussa entalpien avulla laskettuna:

$$h_1 = c_p \cdot T_1 \quad h_{kr} = c_p \cdot T_{kr}$$

Ominaislämpökapasiteetti pidetään vakiona, koska kyseessä on tarkoitus vain havainnollistaa kaasun toimintaa suuttimessa.

$$h_1 = h_{kr} + \frac{c_{kr}^2}{2}$$

$$\frac{c_{kr}^2}{2} = h_1 - h_{kr}$$

$$c_p = (2.19 \cdot 10^3) \frac{J}{kg \cdot K}$$

$$1 J = 1 kg \cdot m^2 / s^2$$

$$\frac{c_{kr}^2}{2} = (c_p \cdot T_1) - (c_p \cdot T_{kr})$$

$$c_{kr}^2 = 2 \cdot c_p \cdot (T_1 - T_{kr})$$

$$c_{kr} = \sqrt{2 \cdot c_p \cdot (T_1 - T_{kr})}$$

$$c_{kr} = \sqrt{\left(2 \cdot (2.19 \cdot 10^3) \frac{J}{kg \cdot K} \cdot (202.331 - 171.035) K\right)}$$

$$c_{kr} = 370.238 \frac{m}{s}$$

Virtaavan kaasun tiheys:

$$R = 0.0831451 \frac{bar \cdot L}{mol \cdot K}$$

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad n = \frac{m}{M} \quad \rho = \frac{m}{V}$$

$$p \cdot V = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T$$

$$M = 16.04 \frac{kg}{mol \cdot 10^3}$$

$$p \cdot V \cdot M = m \cdot R \cdot T$$

$$\frac{m}{V} = \frac{p \cdot M}{R \cdot T}$$

$$\rho = \frac{p \cdot M}{R \cdot T}$$

$$\rho_{CH_4} := \frac{\left(6.75 \text{ bar} \cdot 16.04 \frac{\text{kg}}{\text{mol} \cdot 10^3}\right)}{0.0831451 \frac{\text{bar} \cdot \text{L}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \cdot 171.035 \text{ K}}$$

$$\rho_{CH_4} = 7.614 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Häviöttämän suuttimen läpi kulkeva massavirta:

$$d := 0.025 \text{ m}$$

$$A := \frac{(\pi \cdot d^2)}{4}$$

$$A = (4.909 \cdot 10^{-4}) \text{ m}^2$$

$$q_m = c_{kr} \cdot \rho_{CH_4} \cdot A \quad q_m := 370.238 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 7.614 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot (4.909 \cdot 10^{-4}) \text{ m}^2$$

$$q_m = 1.384 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Laskenta paineen laskiessa ulosvirtauksen takia 6.75 bara:an:

Absoluuttiset paineet:

$$p_0 := 13.5 \text{ bar}$$

$$p_1 := 6.75 \text{ bar}$$

Putken sisälämpötila alkutilassa:

$$T_0 := 202.331 \text{ K}$$

$$\gamma := 1.32$$

Putken sisälämpötila, kun paine laskee 13.5 bara:sta 6.75 bara:an isentrooppisesti:

$$\frac{T_0}{T_1} = \left( \frac{p_0}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad T_1 = \frac{T_0}{\left( \frac{p_0}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \quad T_1 := \frac{202.331 \text{ K}}{\left( \frac{13.5 \text{ bar}}{6.75 \text{ bar}} \right)^{\frac{1.32-1}{1.32}}} \quad T_1 = 171.035 \text{ K}$$

Häviöttömän suutinvirtauksen loppulämpötila paineen laskiessa 6.75 bara:sta 3.375 bara:an:

Kriittinen painesuhde:  $\pi_{kr} = p_{kr} / p_1 = 0.5$

$$p_{kr} = p_1 \cdot 0.5$$

$$p_{kr} := 3.375 \text{ bar}$$

$$\frac{T_{kr}}{T_1} = \left( \frac{p_1}{p_{kr}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad T_{kr} = \frac{T_1}{\left( \frac{p_1}{p_{kr}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \quad T_{kr} := \frac{171.035 \text{ K}}{\left( \frac{6.75 \text{ bar}}{3.375 \text{ bar}} \right)^{\frac{1.32-1}{1.32}}} \quad T_{kr} = 144.58 \text{ K}$$

Suutinvirtauksen nopeus suuttimen lopussa entalpian avulla laskettuna:

$$h_1 = c_p \cdot T_1 \quad h_{kr} = c_p \cdot T_{kr}$$

Ominaislämpökapasiteetti pidetään vakiona, koska kyseessä on tarkoitus vain havainnollistaa kaasun toimintaa suuttimessa.

$$h_1 = h_{kr} + \frac{c_{kr}^2}{2}$$

$$\frac{c_{kr}^2}{2} = h_1 - h_{kr}$$

$$c_p = (2.19 \cdot 10^3) \frac{J}{kg \cdot K}$$

$$1 J = 1 kg \cdot m^2/s^2$$

$$\frac{c_{kr}^2}{2} = (c_p \cdot T_1) - (c_p \cdot T_{kr})$$

$$c_{kr}^2 = 2 \cdot c_p \cdot (T_1 - T_{kr})$$

$$c_{kr} = \sqrt{2 \cdot c_p \cdot (T_1 - T_{kr})}$$

$$c_{kr} = \sqrt{2 \cdot (2.19 \cdot 10^3) \frac{J}{kg \cdot K} \cdot (171.035 - 144.58) K}$$

$$c_{kr} = 340.401 \frac{m}{s}$$

Virtaavan kaasun tiheys:

$$R = 0.0831451 \frac{bar \cdot L}{mol \cdot K}$$

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad n = \frac{m}{M} \quad \rho = \frac{m}{V}$$

$$p \cdot V = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T$$

$$M = 16.04 \frac{kg}{mol \cdot 10^3}$$

$$p \cdot V \cdot M = m \cdot R \cdot T$$

$$\frac{m}{V} = \frac{p \cdot M}{R \cdot T}$$

$$\rho = \frac{p \cdot M}{R \cdot T}$$

$$\rho_{CH_4} = \frac{p_{kr} \cdot M}{R \cdot T_{kr}}$$

$$\rho_{CH_4} := \frac{\left( 3.375 \text{ bar} \cdot 16.04 \frac{\text{kg}}{\text{mol} \cdot 10^3} \right)}{0.0831451 \frac{\text{bar} \cdot \text{L}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \cdot 144.58 \text{ K}}$$

$$\rho_{CH_4} = 4.503 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Häviöttämän suuttimen läpi kulkeva massavirta:

$$d = 0.025 \text{ m}$$

$$A := \frac{(\pi \cdot d^2)}{4}$$

$$A = (4.909 \cdot 10^{-4}) \text{ m}^2$$

$$q_m = c_{kr} \cdot \rho_{CH_4} \cdot A \quad q_m = 340.401 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 4.503 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot (4.909 \cdot 10^{-4}) \text{ m}^2$$

$$q_m = 1.384 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$



Laskenta paineen laskiessa ulosvirtauksen takia 2 bara:an:

Absoluuttiset paineet:

$$p_0 := 54.0 \text{ bar}$$

$$p_1 := 2 \text{ bar}$$

Putken sisälämpötilä alkutilassa:

$$T_0 := 283.15 \text{ K}$$

$$\gamma := 1.32$$

Putken sisälämpötilä, kun paine laskee 54 bara:sta 2 bara:an isentrooppisesti:

$$\frac{T_0}{T_1} = \left( \frac{p_0}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad T_1 = \frac{T_0}{\left( \frac{p_0}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \quad T_1 := \frac{283.15 \text{ K}}{\left( \frac{54 \text{ bar}}{2 \text{ bar}} \right)^{\frac{1.32-1}{1.32}}} \quad T_1 = 127.356 \text{ K}$$

Häviöttömän suutinvirtauksen loppulämpötilä paineen laskiessa 2 bara:sta 1 bara:an:

Kriittinen painesuhde:  $\pi_{kr} = p_{kr} / p_1 = 0.5$

$$p_{kr} = p_1 \cdot 0.5$$

$$p_{kr} := 1 \text{ bar}$$

$$\frac{T_{kr}}{T_1} = \left( \frac{p_1}{p_{kr}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad T_{kr} = \frac{T_1}{\left( \frac{p_1}{p_{kr}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \quad T_{kr} := \frac{127.356 \text{ K}}{\left( \frac{2 \text{ bar}}{1 \text{ bar}} \right)^{\frac{1.32-1}{1.32}}} \quad T_{kr} = 107.657 \text{ K}$$

Suutinvirtauksen nopeus suuttimen lopussa entalpien avulla laskettuna:

$$h_1 = c_p \cdot T_1 \quad h_{kr} = c_p \cdot T_{kr}$$

Ominaislämpökapasiteetti pidetään vakiona, koska kyseessä on tarkoitus vain havainnollistaa kaasun toimintaa suuttimessa.

$$h_1 = h_{kr} + \frac{c_{kr}^2}{2}$$

$$\frac{c_{kr}^2}{2} = h_1 - h_{kr}$$

$$c_p = (2,19 \cdot 10^3) \frac{J}{kg \cdot K}$$

$$1 J = 1 kg \cdot m^2/s^2$$

$$\frac{c_{kr}^2}{2} = (c_p \cdot T_1) - (c_p \cdot T_{kr})$$

$$c_{kr}^2 = 2 \cdot c_p \cdot (T_1 - T_{kr})$$

$$c_{kr} = \sqrt{2 \cdot c_p \cdot (T_1 - T_{kr})}$$

$$c_{kr} = \sqrt{\left(2 \cdot (2,19 \cdot 10^3) \frac{J}{kg \cdot K} \cdot (127,356 - 107,657) K\right)}$$

$$c_{kr} = 293,737 \frac{m}{s}$$

Virtaavan kaasun tiheys:

$$R = 0,0831451 \frac{bar \cdot L}{mol \cdot K}$$

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad n = \frac{m}{M} \quad \rho = \frac{m}{V}$$

$$p \cdot V = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T$$

$$M = 16,04 \frac{kg}{mol \cdot 10^3}$$

$$p \cdot V \cdot M = m \cdot R \cdot T$$

$$\frac{m}{V} = \frac{p \cdot M}{R \cdot T}$$

$$\rho = \frac{p \cdot M}{R \cdot T}$$

$$\rho_{OHA} = \frac{p_{kr} \cdot M}{R \cdot T_{kr}}$$

$$\rho_{CH_4} := \frac{\left(2 \text{ bar} \cdot 16.04 \frac{\text{kg}}{\text{mol} \cdot 10^3}\right)}{0.0831451 \frac{\text{bar} \cdot \text{L}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \cdot 107.657 \text{ K}}$$

$$\rho_{CH_4} = 3.584 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Häviöttämän suuttimen läpi kulkeva massavirta:

$$d := 0.025 \text{ m}$$

$$A := \frac{(\pi \cdot d^2)}{4}$$

$$A = (4.909 \cdot 10^{-4}) \text{ m}^2$$

$$q_m = c_{cr} \cdot \rho_{CH_4} \cdot A \quad q_m := 293.737 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 3.584 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \cdot \text{K}} \cdot (4.909 \cdot 10^{-4}) \text{ m}^2$$

$$q_m = 0.517 \frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{K}}$$

Laskenta paineen laskiessa ulosvirtauksen takia 1,5 bara:an:

Absoluuttiset paineet:

$$p_0 := 54.0 \text{ bar}$$

$$p_1 := 1.5 \text{ bar}$$

Putken sisälämpötila alkutilassa:

$$T_0 := 283.15 \text{ K}$$

$$\gamma := 1.32$$

Putken sisälämpötila, kun paine laskee 54 bara:sta 1.5 bara:an isentrooppisesti:

$$\frac{T_0}{T_1} = \left( \frac{p_0}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad T_1 = \frac{T_0}{\left( \frac{p_0}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \quad T_1 = \frac{283.15 \text{ K}}{\left( \frac{54 \text{ bar}}{1.5 \text{ bar}} \right)^{\frac{1.32-1}{1.32}}} \quad T_1 = 118.777 \text{ K}$$

Häviöttömän suutinvirtauksen loppulämpötila paineen laskiessa 1.5 bara:sta 1 bara:an:

$$p_{kr} := 1 \text{ bar}$$

$$\frac{T_{kr}}{T_1} = \left( \frac{p_1}{p_{kr}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad T_{kr} = \frac{T_1}{\left( \frac{p_1}{p_{kr}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \quad T_{kr} = \frac{118.777 \text{ K}}{\left( \frac{1.5 \text{ bar}}{1 \text{ bar}} \right)^{\frac{1.32-1}{1.32}}} \quad T_{kr} = 107.657 \text{ K}$$

Suutinvirtauksen nopeus suuttimen lopussa entalpiian avulla laskettuna:

$$h_1 = c_p \cdot T_1 \quad h_{kr} = c_p \cdot T_{kr}$$

Ominaislämpökapasiteetti pidetään vakiona, koska kyseessä on tarkoitus vain havainnollistaa kaasun toimintaa suuttimessa.

$$h_1 = h_{kr} + \frac{c_{kr}^2}{2}$$

$$\frac{c_{kr}^2}{2} = h_1 - h_{kr}$$

$$c_p = (2.19 \cdot 10^3) \frac{J}{kg \cdot K}$$

$$\frac{c_{kr}^2}{2} = (c_p \cdot T_1) - (c_p \cdot T_{kr})$$

$$1 J = 1 kg \cdot m^2/s^2$$

$$c_{kr}^2 = 2 \cdot c_p \cdot (T_1 - T_{kr})$$

$$c_{kr} = \sqrt{2 \cdot c_p \cdot (T_1 - T_{kr})}$$

$$c_{kr} = \sqrt{\left(2 \cdot (2.19 \cdot 10^3) \frac{J}{kg \cdot K} \cdot (118.777 - 107.657) K\right)}$$

$$c_{kr} = 220.693 \frac{m}{s}$$

Virtaavan kaasun tiheys:

$$R := 0.0831451 \frac{bar \cdot L}{mol \cdot K}$$

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad n = \frac{m}{M} \quad \rho = \frac{m}{V}$$

$$p \cdot V = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T$$

$$M := 16.04 \frac{kg}{mol \cdot 10^3}$$

$$p \cdot V \cdot M = m \cdot R \cdot T$$

$$\frac{m}{V} = \frac{p \cdot M}{R \cdot T}$$

$$\rho = \frac{p \cdot M}{R \cdot T}$$

$$\rho_{OHA} := \frac{p_{kr} \cdot M}{R \cdot T_{kr}}$$

$$\rho_{CH_4} := \frac{\left(1 \text{ bar} \cdot 16.04 \frac{\text{kg}}{\text{mol} \cdot 10^3}\right)}{0.0831451 \frac{\text{bar} \cdot \text{L}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \cdot 107.657 \text{ K}}$$

$$\rho_{CH_4} = 1.792 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Häviöttämän suuttimen läpi kulkeva massavirta:

$$d = 0.025 \text{ m}$$

$$A := \frac{(\pi \cdot d^2)}{4}$$

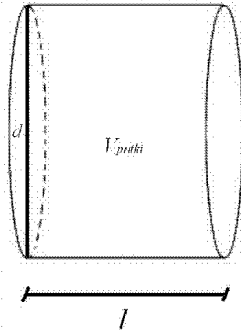
$$A = (4.909 \cdot 10^{-4}) \text{ m}^2$$

$$q_m = c_{kr} \cdot \rho_{CH_4} \cdot A \quad q_m := 220.693 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 1.792 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot (4.909 \cdot 10^{-4}) \text{ m}^2$$

$$q_m = 0.194 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

## Maakaasuputken tyhjennykseen kuluva aika

Metaanin määrä putkessa 5 km, painetaso 54 bar:



$$T_{putki} := 283.15 \text{ K} \quad R := 0.0831451 \frac{\text{bar} \cdot \text{L}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$$

$$p_{putki} := 54 \text{ bar}$$

$$p_2 := 1.01325 \text{ bar} \quad M_{CH_4} := 16.04 \frac{\text{kg}}{\text{mol} \cdot 10^3}$$

$$d := 0.2151 \text{ m}$$

$$l_1 := 5000 \text{ m}$$

$$V_{putki} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot l_1$$

$$V_{putki} := \frac{\pi \cdot (0.2151 \text{ m})^2}{4} \cdot 5000 \text{ m}$$

$$V_{putki} = (1.817 \cdot 10^5) \text{ L}$$

Metaanin tilavuus normaaliolosuhteissa:

$$p_1 := 54 \text{ bar} \quad T_{putki} := 283.15 \text{ K} \quad V_{putki} = 181.694 \text{ m}^3$$

$$p_2 := 1.01325 \text{ bar} \quad T_2 := 273.15 \text{ K}$$

$$\frac{p \cdot V}{T} = \text{vakio} \quad \frac{p_1 \cdot V_{putki}}{T_{putki}} = \frac{p_2 \cdot V_{n_{CH_4}}}{T_2}$$

$$V_{n_{CH_4}} := \frac{T_2 \cdot p_1 \cdot V_{putki}}{T_{putki} \cdot p_2}$$

$$V_{n_{CH_4}} := \frac{273.15 \text{ K} \cdot 54 \text{ bar} \cdot 181.694 \text{ m}^3}{283.15 \text{ K} \cdot 1.01325 \text{ bar}}$$

$$V_{n_{CH_4}} = (9.341 \cdot 10^3) \text{ m}^3$$

Putken sisältämän metaanin energiamäärä:

$$H_{\text{tehollinen}} = (36 \cdot 10^6) \frac{\text{J}}{\text{m}^3} \quad V_{\text{n,CH}_4} = (9,341 \cdot 10^3) \text{ m}^3$$

$$E_{\text{CH}_4} = H_{\text{tehollinen}} \cdot V_{\text{n,CH}_4}$$

$$E_{\text{CH}_4} = (36 \cdot 10^6) \frac{\text{J}}{\text{m}^3} \cdot (9,341 \cdot 10^3) \text{ m}^3$$

$$E_{\text{CH}_4} = (3,363 \cdot 10^{11}) \text{ J}$$

Muunto megawattitunneiksi:

$$1 \text{ J} = (2,77778 \cdot 10^{-7}) \text{ kWh}$$

$$E_{\text{CH}_4} = (3,363 \cdot 10^{11}) \text{ J}$$

$$Q_{\text{CH}_4} = E_{\text{CH}_4} \cdot (2,77778 \cdot 10^{-7}) \text{ kWh}$$

$$Q_{\text{CH}_4} = (2,77778 \cdot 10^{-7}) \cdot (3,363 \cdot 10^{11}) = 9,342 \cdot 10^4 \text{ kWh}$$

$$Q_{\text{CH}_4} = 93,42 \text{ MWh}$$

Metaanin määrän polttamiseen kuluva aika 3 MW:n soihdulta:

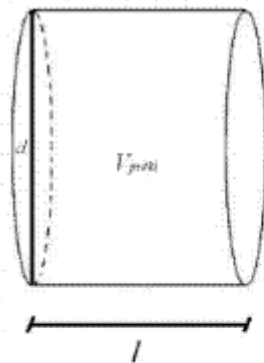
$$P_{\text{soihku}} = \frac{Q_{\text{CH}_4}}{t}$$

$$t = \frac{Q_{\text{CH}_4}}{P_{\text{soihku}}}$$

$$t = \frac{93,42 \text{ MWh}}{3 \text{ MW}} \approx 31 \text{ h}$$



Metaanin määrä putkessa 10 km, painetaso 54 bar:



$$T_{putki} := 283.15 \text{ K} \quad R := 0.0831451 \frac{\text{bar} \cdot \text{L}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$$

$$p_{putki} := 54 \text{ bar}$$

$$M_{CH_4} := 16.04 \frac{\text{kg}}{\text{mol} \cdot 10^3}$$

$$p_2 := 1.01325 \text{ bar}$$

$$d := 0.2151 \text{ m}$$

$$l_2 := 10000 \text{ m}$$

$$V_{putki} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot l_1$$

$$V_{putki} := \frac{\pi \cdot (0.2151 \text{ m})^2}{4} \cdot 10000 \text{ m}$$

$$V_{putki} = 363.388 \text{ m}^3$$

Metaanin tilavuus normaaliolosuhteissa:

$$p_1 := 54 \text{ bar}$$

$$T_{putki} := 283.15 \text{ K}$$

$$V_{putki} = 363.388 \text{ m}^3$$

$$p_2 := 1.01325 \text{ bar}$$

$$T_2 := 273.15 \text{ K}$$

$$\frac{p \cdot V}{T} = \text{vakio} \quad \frac{p_1 \cdot V_{putki}}{T_{putki}} = \frac{p_2 \cdot V_{n,CH_4}}{T_2}$$

$$V_{n,CH_4} := \frac{T_2 \cdot p_1 \cdot V_{putki}}{T_{putki} \cdot p_2}$$

$$V_{n,CH_4} := \frac{273.15 \text{ K} \cdot 54 \text{ bar} \cdot 363.388 \text{ m}^3}{283.15 \text{ K} \cdot 1.01325 \text{ bar}}$$

$$V_{n,CH_4} = (1.868 \cdot 10^4) \text{ m}^3$$

Putken sisältämän metaanin energiamäärä:

$$H_{\text{tehollinen}} := (36 \cdot 10^6) \frac{\text{J}}{\text{m}^3} \quad V_{n,\text{CH}_4} = (1.868 \cdot 10^4) \text{ m}^3$$

$$E_{\text{CH}_4} = H_{\text{tehollinen}} \cdot V_{n,\text{CH}_4}$$

$$E_{\text{CH}_4} := (36 \cdot 10^6) \frac{\text{J}}{\text{m}^3} \cdot (1.868 \cdot 10^4) \text{ m}^3$$

$$E_{\text{CH}_4} = (6.725 \cdot 10^{11}) \text{ J}$$

Muunto megawattitunneiksi:

$$1 \text{ J} = (2.77778 \cdot 10^{-7}) \text{ kWh}$$

$$E_{\text{CH}_4} = (6.725 \cdot 10^{11}) \text{ J}$$

$$Q_{\text{CH}_4} = E_{\text{CH}_4} \cdot (2.77778 \cdot 10^{-7}) \text{ kWh}$$

$$Q_{\text{CH}_4} = (2.77778 \cdot 10^{-7}) \cdot (6.725 \cdot 10^{11}) = 186805.71 \text{ kWh}$$

$$Q_{\text{CH}_4} = 186,806 \text{ MWh}$$

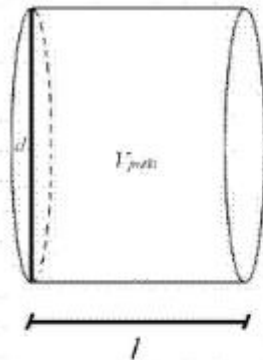
Metaanin määrän polttamiseen kuluva aika 3 MW:n soihdulta:

$$P_{\text{soihku}} = \frac{Q_{\text{CH}_4}}{t}$$

$$t = \frac{Q_{\text{CH}_4}}{P_{\text{soihku}}}$$

$$t = \frac{186,806 \text{ MWh}}{3 \text{ MW}} \approx 62 \text{ h}$$

Metaanin määrä putkessa 15 km, painetaso 54 bar:



$$T_{\text{putki}} := 283.15 \text{ K} \quad R := 0.0831451 \frac{\text{bar} \cdot \text{L}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$$

$$p_{\text{putki}} := 54 \text{ bar}$$

$$p_2 := 1.01325 \text{ bar}$$

$$d := 0.2151 \text{ m}$$

$$l_3 := 15000 \text{ m}$$

$$M_{\text{CH}_4} := 16.04 \frac{\text{kg}}{\text{mol} \cdot 10^{-3}}$$

$$V_{\text{putki}} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot l_3$$

$$V_{\text{putki}} := \frac{\pi \cdot (0.2151 \text{ m})^2}{4} \cdot 15000 \text{ m}$$

$$V_{\text{putki}} = 545.082 \text{ m}^3$$

Metaanin tilavuus normaaliolosuhteissa:

$$p_1 := 54 \text{ bar}$$

$$T_{\text{putki}} := 283.15 \text{ K}$$

$$V_{\text{putki}} := 545.082 \text{ m}^3$$

$$p_2 := 1.01325 \text{ bar}$$

$$T_2 := 273.15 \text{ K}$$

$$\frac{p \cdot V}{T} = \text{vakio} \quad \frac{p_1 \cdot V_{\text{putki}}}{T_{\text{putki}}} = \frac{p_2 \cdot V_{n,\text{CH}_4}}{T_2}$$

$$V_{n,\text{CH}_4} := \frac{T_2 \cdot p_1 \cdot V_{\text{putki}}}{T_{\text{putki}} \cdot p_2}$$

$$V_{n,\text{CH}_4} := \frac{273.15 \text{ K} \cdot 54 \text{ bar} \cdot 545.082 \text{ m}^3}{283.15 \text{ K} \cdot 1.01325 \text{ bar}}$$

Putken sisältämän metaanin energiamäärä:

$$H_{\text{tehollinen}} = (36 \cdot 10^6) \frac{\text{J}}{\text{m}^3} \quad V_{\text{n,CH}_4} = (2.802 \cdot 10^4) \text{ m}^3$$

$$E_{\text{CH}_4} = H_{\text{tehollinen}} \cdot V_{\text{n,CH}_4}$$

$$E_{\text{CH}_4} = (36 \cdot 10^6) \frac{\text{J}}{\text{m}^3} \cdot (2.802 \cdot 10^4) \text{ m}^3$$

$$E_{\text{CH}_4} = (1.009 \cdot 10^{12}) \text{ J}$$

Muunto megawattitunneiksi:

$$1 \text{ J} = (2,77778 \cdot 10^{-7}) \text{ kWh}$$

$$E_{\text{CH}_4} = (1,009 \cdot 10^{12}) \text{ J}$$

$$Q_{\text{CH}_4} = E_{\text{CH}_4} \cdot (2,77778 \cdot 10^{-7}) \text{ kWh}$$

$$Q_{\text{CH}_4} = (2,77778 \cdot 10^{-7}) \cdot (1,009 \cdot 10^{12}) = 280278,00 \text{ kWh}$$

$$Q_{\text{CH}_4} = 280,278 \text{ MWh}$$

Metaanin määrän polttamiseen kuluva aika 3 MW:n soihdulta:

$$P_{\text{soihku}} = \frac{Q_{\text{CH}_4}}{t}$$

$$t = \frac{Q_{\text{CH}_4}}{P_{\text{soihku}}}$$

$$t = \frac{280,278 \text{ MWh}}{3 \text{ MW}} \approx 93 \text{ h}$$