

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

Konetekniikan koulutusohjelma

*Olli Hyvönen*

**MAAKAASUN PAINEENVÄHENNYSASEMAN  
PAINEENVÄHENNYSLAITTEEN MITOITUS**

Työn tarkastajat:

Professori Aki Mikkola

TkT Kimmo Kerkkänen

## TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto  
Teknillinen tiedekunta  
Konetekniikan koulutusohjelma

Olli Hyvönen

### **Maakaasun paineenvähennysaseman paineenvähennyslaitteen mitoitus**

Diplomityö

2013

61 sivua, 9 kuvaa ja 4 taulukkoa

Tarkastajat: Professori Aki Mikkola  
Tkt Kimmo Kerkkänen

Hakusanat: Maakaasu, paineenvähennyslaite

Diplomityö tehtiin maakaasun paineenvähennysaseman paineenvähennyslaitteen mitoituksesta. Työn kuluessa suunniteltiin ja toteutettiin mitoitusohjelma maakaasun paineenvähennyslaitteen mitoitukseen. Työssä tutustutaan maakaasun putkivirtaukseen ja paineenvähennysaseman paineenvähennyslaitteeseen. Työssä selvitetään paineenvähennyslaitteen eri osien toiminta ja tarve, sekä kuinka niiden mitoitus ja valinta tapahtuu.

Lopputuloksena työstä saatiin suunniteltua ja toteutettua mitoitusohjelma paineenvähennyslaitteelle. Mitoitusohjelman avulla saadaan helposti ja nopeasti selville sopivat osat paineenvähennyslaitteeseen halutulla painetasolla ja ainemäärällä. Ohjelman on tarkoitus helpottaa ja nopeuttaa paineenvähennyslaitteen mitoitusta ja suunnittelua.

## ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology  
Faculty of Technology  
Department of Mechanical Engineering

Olli Hyvönen

### **Measurement of the regulating unit of the regulating station of natural gas**

Master's thesis

2013

61 pages, 9 figures and 4 tables

Examiners: Professor Aki Mikkola  
D. Sc. (Tech) Kimmo Kerkkänen

Keywords: Natural gas, regulating station

This master's thesis is made about measurement of the regulating unit of the regulating station of natural gas. A measurement program for regulating unit of natural gas was designed and implemented during the thesis work. In this thesis one is made acquaintance of the pipe flow of natural gas and of the regulating unit of the regulating station. In the thesis it's found out the function and need of different components of the regulating unit of the regulating station and how does the measurement of those different components happen.

As a result of the master's thesis was the measurement program for regulating unit of natural gas achieved. With the measurement program it's easier and faster to find out the right components for regulating unit of natural gas. The goal of the program was to make designing and choosing of different components easier and faster.

## ALKUSANAT

Haluan kiittää kaikkia, jotka ovat osaltaan olleet mukana tekemässä tämän mahdolliseksi ja tukeneet minua niin tämän työn tekemisessä, kuin myös muussa opiskelussa. Iso kiitos kuuluu Matti Sainiolle mahdollisuudesta tehdä tämä diplomityö, sekä ohjaajilleni Henry Stoorille ja Kari Nykäselle työpaikaltani hyvistä neuvoista ja ohjeista diplomityöhöni liittyen.

Porvoossa 25.11.2013

Olli Hyvönen

# SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO .....	9
1.1	Taustaa .....	9
1.2	Työn tavoitteet ja rajausta.....	10
2	MAAKAASUN PAINEENVÄHENNYSASEMAN TOIMINTAPERIAATE JA MITOITUSPERIAATTEET .....	12
2.1	Maakaasuputkistot .....	13
2.2	Paineenvähennysasema siirtoputkistossa.....	14
2.2.1	Suodatin .....	15
2.2.2	Turvalaitteet .....	16
2.2.3	Kaasun lämmitys.....	17
2.2.4	Paineensäätöventtiili .....	17
2.2.5	Kaasumäärän mittaaminen.....	19
2.3	Kaasun virtaus putkistossa.....	19
2.4	Kaasun tilanyhtälöt .....	21
2.5	Kaasun kokoonpuristuvuus.....	22
2.6	Viskositeetti .....	24
2.7	Virtausmuodot .....	25
2.7.1	Virtausvastuskerroin .....	25
2.8	Putkiston sisäpinnan karheus .....	26
2.9	Kaasuverkoston jako elementteihin .....	27
2.10	Mekaniikan peruslait virtauksessa .....	27
2.10.1	Massan säilymlaki.....	27
2.10.2	Newtonin toinen laki.....	28
2.10.3	Energian säilymlaki.....	29

2.11	Maakaasuputkiston ja paineenvähennysaseman mitoitusperiaatteet .....	31
2.11.1	Painehäviö.....	32
2.11.2	Kaasuvirran nopeus ja tilavuusvirta putkistossa.....	34
2.11.3	Suodattimen mitoitus .....	36
2.11.4	Säätöventtiilin mitoitus .....	37
2.11.5	Lämmönvaihtimen mitoitus.....	39
2.11.6	Määrämittarin mitoitus .....	40
3	MITOITUSOHJELMISTON KEHITTÄMINEN .....	42
3.1	Putkisto .....	43
3.2	Suodatin .....	46
3.3	Paineenvähennysventtiili .....	46
3.4	Turvalaitteet .....	48
3.5	Lämmönvaihdin .....	48
3.6	Määrämittarit .....	49
3.7	CASE: Maakaasun paineenvähennysaseman paineenvähennyslaitteen mitoitus	49
3.7.1	Putkiston mitoitus .....	50
3.7.2	Suodattimen mitoitus .....	51
3.7.3	Paineenvähennysventtiilin mitoitus .....	52
3.7.4	Turvalaitteet .....	53
3.7.5	Lämmitys .....	54
3.7.6	Kaasumäärämittari .....	55
4	TULOSTEN TARKASTELU.....	56
5	YHTEENVETO.....	59
	LÄHTEET .....	60

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

$\beta$	Lämpölaajenemiskerroin
$\eta$	Dynaaminen viskositeetti
$\lambda$	Virtausvastuskerroin
$\nu$	Kinemaattinen viskositeetti
$\rho$	Tiheys
$\zeta$	Kertavastuskerroin
$\tau_{ij}$	Leikkausjännitys
$\varphi$	Lämpövirta
$A$	Pinta-ala
$C$	Vakio
$C_f$	Suodatinvakio
$C_p$	Ominaislämpökapasiteetti
$D$	Putken halkaisija
$e$	Sisäenergia
$f_R$	Vastusvoima
$G$	Massa
$g$	Putoamiskiihtyvyys
$h$	Korkeus
$k$	Putken sisäpinnan karheus
$K_G$	Virtausvakio
$L$	Putken pituus
$M$	Moolimassa
$M$	Massavirta
$M_{IN}$	Putkistoon tuleva massavirta
$M_{OUT}$	Lähtevä massavirta
$\tilde{M}_0$	Keskimääräinen massavirta
$P$	Paine
$\tilde{P}_0$	Keskipaine
$P_{ABS}$	Absoluuttinen paine
$P_{IN}$	Tulopaine

$P_{OUT}$	Lähtöpaine
$P_{kri}$	Kriittinen paine
$\Delta P$	Painehäviö
$\Delta P_{spec}$	Määrämittarin maksimipainehäviö
$Q$	Tilavuusvirta
$Q_N$	Tilavuusvirta normaaliolotilassa
$Q_{max}$	Maksimi virtausmäärä
$R$	Yleinen kaasuvakio
$S$	Putken poikkileikkauksen pinta-ala
$t$	Aika
$T$	Lämpötila
$T_{ABS}$	Absoluuttinen lämpötila
$T_E$	Ympäristön lämpötila
$T_{kri}$	Kriittinen lämpötila
$\tilde{T}_0$	Keskimääräinen lämpötila
$V$	Tilavuus
$w$	Virtausnopeus
$x$	Sijainti putken suuntaisesti
$z$	Kokoonpuristuvuuskerroin
$\tilde{z}_0$	Keskimääräinen kokoonpuristuvuuskerroin
$DN$	Putkikoko
$KG$	Virtauskapasiteettikerroin
$Re$	Reynoldsin luku



## 1 JOHDANTO

### 1.1 Taustaa

Maakaasu on luonnonkaasua. Se on valmista polttoainetta ilman jatkojalostusta jo tuotantokentiltä lähtien. Maakaasua saadaan talteen samankaltaisista tuotantolähteistä kuin öljyäkin. Eri tuotantolähteistä saadun kaasun koostumukset eroavat kuitenkin jonkin verran toisistaan ja jokaisella maantieteellisesti eri tuotantoalueella maakaasulla on omat ominaiskoostumuksensa. (Riikonen. 1993. s.1) Taulukosta 1 nähdään eri tuotantoalueiden kaasukoostumuksia.

**Taulukko 1.** Eri tuotantoalueiden kaasukoostumuksia. (Maakaasukäsikirja. 2010. s.6)

<i>Kenttä</i>	<i>Venäjä</i>	<i>Saksa</i>	<i>USA</i>	<i>Hollanti</i>	<i>Norja</i>
	<i>Urengoi</i>	<i>Goldenstedt</i>	<i>Kansas</i>	<i>Groningen</i>	<i>Troll</i>
Metaani $CH_4$	98 %	88,0 %	84,1 %	81,3 %	93,2 %
Etaani $C_2H_6$	0,8 %	1,0 %	6,7 %	2,8 %	3,7 %
Propani $C_3H_8$	0,2 %	0,2 %	0,3 %	0,4 %	0,4 %
Butaani $C_4H_{10}$	0,02 %	-	-	0,4 %	0,5 %
Typpi $N_2$	0,9 %	10,0 %	8,4 %	14,3 %	1,6 %
Hiilidioksidi $CO_2$	0,1 %	0,8 %	0,8 %	0,9 %	0,6 %

Suomeen maakaasua tulee Venäjän kaasukentiltä, joissa kaasu on miltei täysin metaania. Metaania käytetään polttoaineena, johon se soveltuu polttokemiallisten vaatimusten perusteella parhaiten fossiilisista polttoaineista. Palamisominaisuuksista johtuen sitä voidaan käyttää monissa eri käyttökohteissa, pienistä keittiöliesistä aina tuhansien megawattien tehoisiin voimalaitoksiin. (Riikonen. 1997. s.4, 7)

Maakaasua siirretään kaasumaisessa olomuodossa putkikuljetuksina siirtoputkiston avulla kaasukentiltä käyttökohteisiin. Suomessa siirtoputkiston kaasun paine on yleensä 30–54 baria, uusia siirtoputkia rakennetaan kuitenkin myös jopa 80 barin paineelle. (Gasum Oy. 2012). Muualla maailmassa rakennetaan putkia vielä korkeammille paineille. Esimerkiksi Venäjältä Saksaan menevän meriputken painetaso on 220 bar.

Siirtoputkistolla kaasu johdetaan paineenvähennysasemille, joissa kaasun paine alennetaan käyttökohteen tai jakeluputken vaatimalle tasolle. Paineenvähennysasemilla myös mitataan asiakkaalle tai jakeluputkeen menevä kaasumäärä. Paineenvähennysasemia siirtoverkostossa on tällä hetkellä 134 kappaletta. (Gasum Oy. 2012.)

Työ tehdään jatkona kandidaatintyölle, jonka otsikkona oli ”Maakaasun paineenvähennysaseman paineenvähennyslaitteen mitoitusperiaatteet”, tekijänä Olli Hyvönen vuonna 2013. Sekä kandidaatintyö, että tämä diplomityö tehdään Neste Jacobs Oy:n toimeksiannosta. Neste Jacobs on vaativien teknologia- suunnittelu- ja projektijohtopalveluiden ja ratkaisujen toimittaja laajalle öljy-, kaasu-, petrokemian- ja kemianteollisuuden sekä biotekniikan alan yrityksille. Neste Jacobsilla on yli 50 vuoden kokemus teknologiakehityksestä ja investointihankkeiden toteutuksesta Euroopassa, Pohjois- ja Etelä-Amerikassa, Aasiassa ja Lähi-idässä. Neste Jacobs työllistää 1000 ammattilaista maailmanlaajuisesti. Alun perin Neste Jacobs on lähtöisin vuonna 1956 perustetusta Neste Oy:n öljynjalostamon suunnitteluosastosta, joka sittemmin yhtiöitettiin vuonna 1999 Neste Engineering Oy:ksi. Vuonna 2004 Jacobs Engineering Inc tuli vähemmistöosakkaaksi ja yhtiön uudeksi nimeksi tuli Neste Jacobs Oy. Neste Oil omistaa 60 % Neste Jacobs Oy:stä ja Jacobs Engineering Inc loput 40 %.

## 1.2 Työn tavoitteet ja rajaus

Työn tavoitteena on suunnitella ja tehdä ohjelmisto siirtoputkistossa olevan paineenvähennysaseman mitoituksen helpottamiseksi. Ohjelmistoon kootaan kaikki tarvittavat mitoitusyhtälöt, jonka jälkeen käyttäjän tulee vain syöttää ohjelmistoon tarvittavat lähtötiedot yhtälöille. Ohjelmistosta saa ulos tarvittavat tiedot paineenvähennysaseman eri laitteiden valinnalle.

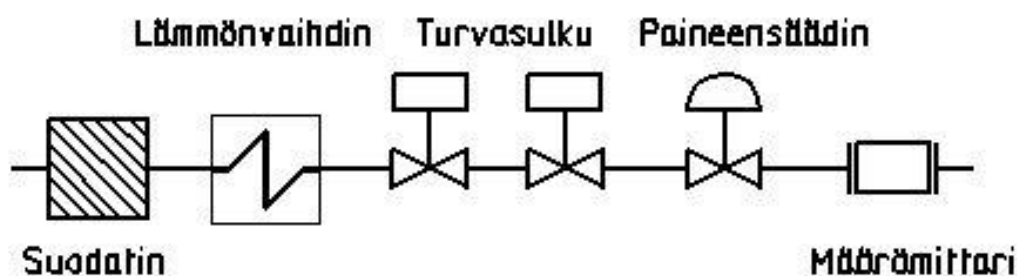
Työ rajataan koskemaan maakaasun siirtolinjan yhteydessä olevia paineenvähennysasemia mekaanisilta osilta. Kaikki sähkö- ja elektroniikkaosat sekä kustannuslaskelmat jäävät aiheen ulkopuolelle.

## 2 MAAKAASUN PAINEENVÄHENNYSASEMAN TOIMINTAPERIAATE JA MITOITUSPERIAATTEET

Maakaasun paineenvähennysaseman päätehtävät ovat kaasun paineenvähennys ja –säätö, asemasta läpivirtaavan maakaasumäärän mittaaminen, ylipaineen estäminen paineenvähennysaseman jälkeisessä putkistossa sekä kaasun hajustaminen. (El Golli et al. 2006. s.1.) Maakaasun ollessa normaalisti väritöntä ja hajutonta kaasua, täytyy se hajustaa, jotta mahdolliset vuodot putkistossa ja käyttökohteissa olisi helpommin havaittavissa. Maakaasun hajustamiseen käytetään rikkiptoisia hajusteita, yleisimmin tetrahydrotiofeenia (THT). (Riikonen. 1993. s.38.)

Paineenvähennysasema määritellään standardin SFS-EN-12186 mukaan kokonaisuudeksi, joka muodostuu kaasun paineensäätöön ja ylipaineensuojaukseen liittyvistä laitteistoista tulo- ja lähtöputkistojen sulkuventtiileille asti sekä kaikista rakenteista, joiden sisällä laitteisto sijaitsee. (SFS-EN 12186. 3.2.9). Paineenvähennysasemalla paineensäätimen lisäksi on myös suodatin, jonka tehtävänä on estää epäpuhtauksien pääsy paineensäätimeen, josta voisi seurata paineensäätimen toimintahäiriö tai mahdollisesti jopa rikkoontuminen. Maakaasu ei itsessään sisällä kiinteitä epäpuhtauksia, mutta rakennustöiden yhteydessä putkistoon on voinut päästä epäpuhtauksia, jotka lähtevät kaasun virtauksen mukana liikkeelle. (Riikonen. 1985. s.21.)

Kuvasta 1 nähdään periaatekuva maakaasun paineenvähennysasemasta ja kuvasta 2 miltä valmis paineenvähennysasema näyttää suojarakennuksen sisällä. Tyypillisesti putkistojen painetasot ilmaistaan putkiston värin avulla, kuvassa 2 korkeapaineinen siirtoputkisto on violettiä putkea ja matalapaineinen jakeluputki on keltaista putkea.



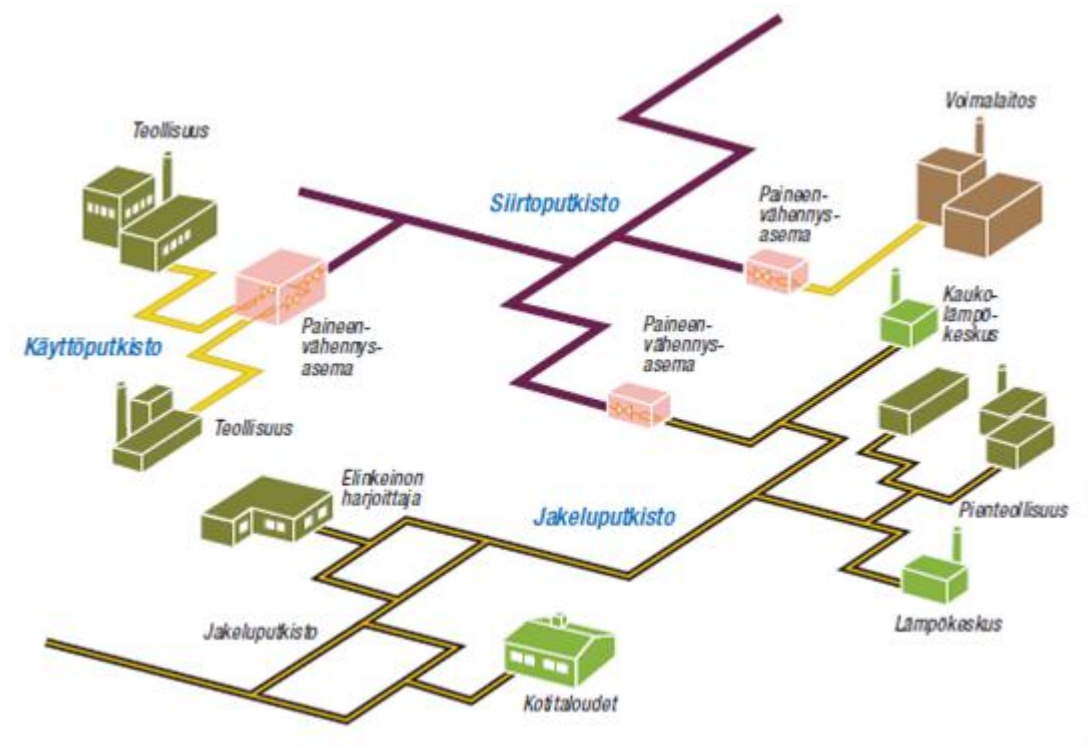
**Kuva 1.** Periaatekuva maakaasun paineenvähennysasemasta.



**Kuva 2.** Paineenvähennysaseman sisätilat.

## 2.1 Maakaasuputkistot

Maakaasuputkistot voidaan jakaa kolmeen eri ryhmään käyttötarkoituksensa mukaisesti. Ryhmät ovat siirtoputkisto, jakeluputkisto ja käyttöputkisto. Siirtoputkistossa maakaasua siirretään korkeapaineisena maanalaisen putkiston avulla lähelle käyttöalueita, josta se edelleen paineenvähennysaseman kautta siirretään käyttökohteisiin jakeluputken avulla. Siirtoputkiston paine vaihtelee Suomessa 30–54 bar välillä ja osa kaasuputkistosta on rakennettu jopa 80 barin painetasolle, kaikkia putkia käytetään silti edelleen 54 barin painetasolla. Siirtoputkiston rakentamiseen käytetään lämpöeristämättömiä muovipinnoitettuja teräsputkia, joissa pinnoituksen tarkoituksena on suojata putkistoa korroosiolta katodisen suojauksen kanssa. Jakeluputken paine Suomessa vaihtelee 1-30 bar välillä käyttökohteesta riippuen. Jakeluputkistot ovat joko teräs- tai muoviputkia. (Riikonen. 1985. s.2-4.) Kuvasta 3 nähdään havainnollistava esimerkki putkiston jaottelusta.



**Kuva 3.** Maakaasuputkistojen jaottelu. (Maakaasukäsikirja. 2010. s.24)

## 2.2 Paineenvähennysasema siirto-putkistossa

Maakaasun siirto-putkiston yhteydessä olevien paineenvähennysasemien tehtävänä on alentaa siirto-putkistossa olevan maakaasun painetta (30...54 bar) jakelu-putkistolle sopivaan paineeseen (1...30 bar). Siirto-putkistossa olevat paineenvähennysasemat sijaitsevat usein suurten kaasunkäyttökeskittymien lähistöllä. Niistä johdetaan kaasua jakelu-putkiston avulla teollisuuslaitoksille, lämpökeskuksille ja pienkuluttajille. Jakelu- ja siirto-putkiston yhteydessä olevat paineenvähennysasemat ovat keskenään hyvin samanlaisia laitteistoltaan, siirto-putkiston korkeamman paineen takia siirto-putkiston yhteydessä olevan paineenvähennysaseman varustelu on hieman monipuolisempi.

Paineenvähennyslaite jakelu-putkiston yhteydessä koostuu yleensä kahdesta täydellisestä paineenvähennys- ja määrämittaustilasta. Molemmat tilat on mitoitettu täydelle kaasumäärälle. Toinen tiloista on varalinja, toisen ollessa käytössä. Asetusarvojen porrastuksen ansiosta siirtyä kaasun virtaus varalinjalle paineensäätöventtiilin vikaantuessa.

### 2.2.1 Suodatin

Maakaasun paineenvähennysasemalla on suodatin ennen muita paineenvähennyslaitteita poistamassa maakaasun seasta kiinteät partikkelit sekä nestemäiset aineet kuten pienet öljy-, metanoli- ja vesipisarat. Muihin paineenvähennyslaitteisiin joutuessaan epäpuhtaudet voisivat aiheuttaa laitteiden hajoamisen.

Suodattimena maakaasun paineenvähennysasemalla käytetään niin sanottua patruunasuodatinta vaihdettavilla suodattimilla. Taulukossa 2 on esitetty suodattimelta vaadittuja suodattavuusarvoja eri käyttökohteissa.

**Taulukko 2.** Suodattimien suodattavuusarvoja (Neste Jacobs Oy. 2011. s.9)

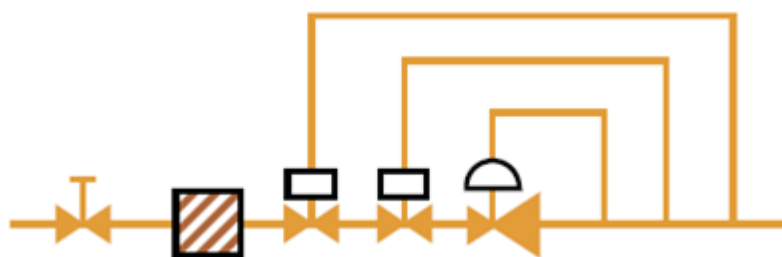
<b>Lämmönvaihtimet</b>		
	Koko	Suodattavuus
Kiinteät partikkelit	2...8 µm	99,0 %
	> 8 µm	100 %
<b>Kaasuturbiinit</b>		
	Koko	Suodattavuus
Kiinteät partikkelit	> 1 µm	98,90 %
	> 3 µm	99,00 %
	> 5 µm	99,99 %
Nestepisarat	> 1 µm	98,60 %
	> 3 µm	98,90 %
	> 5 µm	99,97 %
<b>Jalostamattoman materiaalin käyttö (esimerkiksi vety-yksikkö)</b>		
	Koko	Suodattavuus
Kiinteät partikkelit	0,5 - 1,0 µm	99,5 %
	> 1,0 µm	100 %
Nestepisarat	0,3 - 1,0 µm	99,5 %
	> 1,0 µm	100 %

## 2.2.2 Turvalaitteet

Paineenvähennysaseman laitteisto koostuu paineensäätöventtiilistä ja yleensä kahdesta turvasulkuventtiilistä sekä varoventtiilistä. Laite voi vaihtoehtoisesti olla varustettu kahdella paineensäätöventtiilillä ja yhdellä turvasulkuventtiilillä ja varoventtiilillä. Varoventtiilit mitoitetaan yleensä vuotokaasua varten niin, että läpäisykyky on 10 % maksimi kaasumäärästä. Täyskapasiteettista varoventtiiliä tulisi välttää, minimoiden ilmakehään puhallettavan kaasumäärän. (SFS-EN 12186. 8.3.2.).

Standardin SFS-EN 12186 mukaan paineensäätö- ja varolaitteet tulee suunnitella, asentaa ja säätää niin, ettei kaasun paine ylitä suurinta sallittua käyttöpainetta paineenvähennyslaitteistossa tai siitä lähtevässä putkessa. Varolaitteina käytetään joko varasäädintä tai turvasulkuventtiiliä. Niiden määrä ja tarve on tapauskohtaista riippuen aina säätimelle tulevasta kaasun paineesta. Turvajärjestelmän tulee toimia automaattisesti paineensäätöjärjestelmän vikaantuessa estäen paineen nousun sallittujen rajojen yläpuolelle. (SFS-EN 12186. 8.3.)

Maksimikäyttöpaineen ollessa suurempi ennen säädintä kuin maksimihäiriöpaineen säätimen jälkeen, on säätimen yhteydessä oltava yksi turvajärjestelmä. Maksimihäiriöpaineella tarkoitetaan väliaikaista painetta, joka voi olla kaasujärjestelmässä häiriötapausten yhteydessä. Yhden turvajärjestelmän lisäksi tarvitaan toinen turvalaite, kun maksimikäyttöpaineiden erotus ennen säädintä ja sen jälkeen on yli 16 bar ja maksimikäyttöpaine ennen säädintä on suurempi kuin lujuuskoepaine säätimen jälkeen. (SFS-EN 12186. 8.3.3.) Kuvasta 4 nähdään periaatekuva paineenvähennyslaitteistosta kahdella turvalaitteella.



**Kuva 4.** Paineenvähennyslaitteisto kahdella turvalaitteella. Kaksi turvasulkuventtiiliä ja paineensäädin. (Maakaasukäsikirja. 2010. s.63)



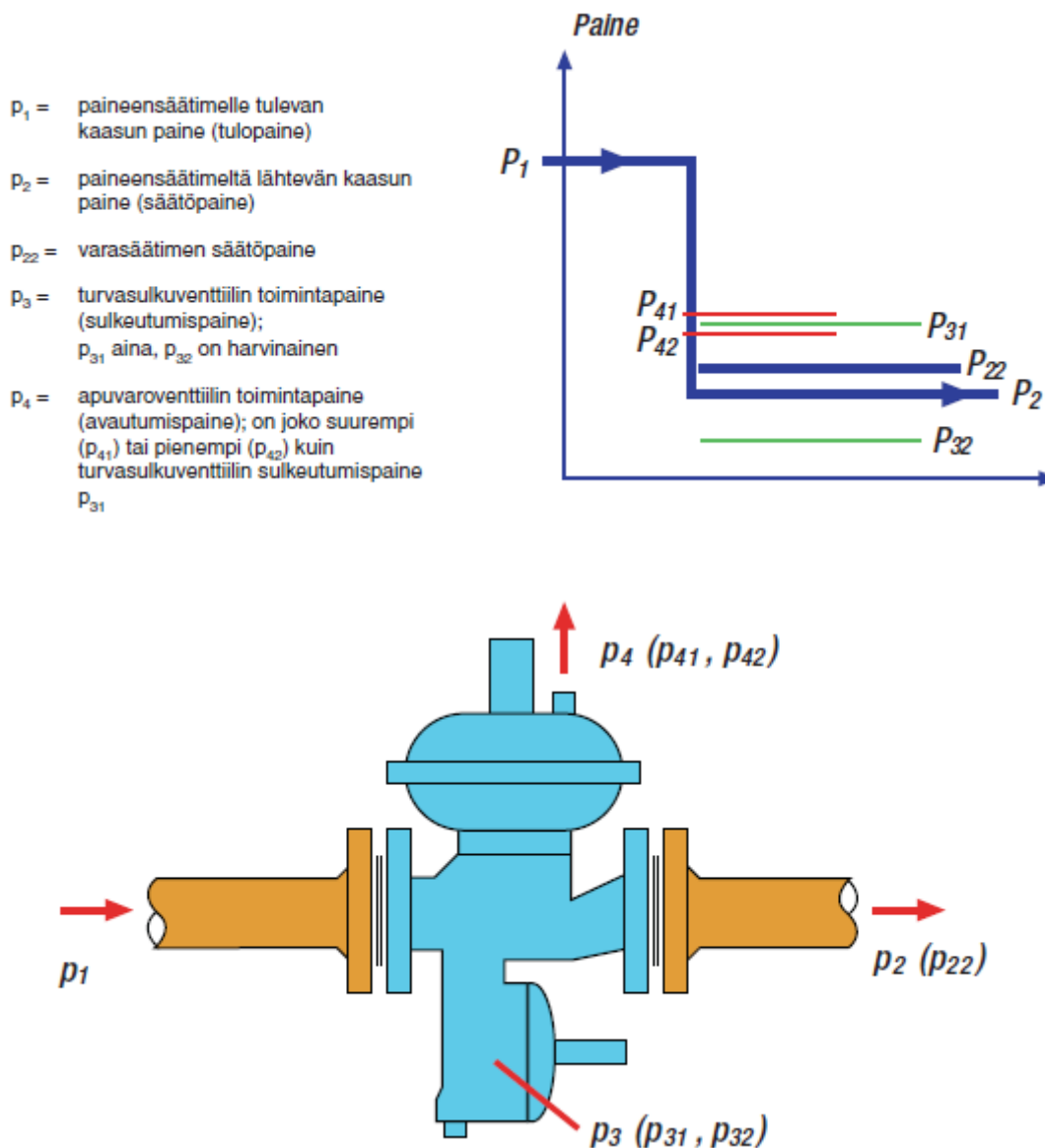
Paineenvähennyslaitteisto sijoitetaan yleisimmin teräsrakenteiseen suojarakennukseen, jossa on usein erillinen laitetila lämpökeskusta, sähkölaitteita ja käytön valvonnan viestilaitteita varten. (Riikonen. 1985. s.19–20).

### 2.2.3 Kaasun lämmitys

Kaasun lämpötila laskee paineen alentuessa Joule-Thomson –ilmiön mukaisesti. Näin ollen paineenvähennysasemalla tarvitaan myös lämmitin kaasulle. Lämpötilan lasku riippuu kaasun paineesta, koostumuksesta ja lähtölämpötilasta. Maakaasulla se on 0,4 °C/bar. Kaasua lämmitetään paineenvähennysasemalla sijaitsevalla lämmönvaihtimella, jossa kiertää vesiglykoliseos. (Riikonen. 1985. s.21–22.) Vaihtoehtoisesti kaasun joukkoon voidaan injektoida inhibiittoria, jolla estetään hydraatin muodostuminen kaasun joukkoon. (SFS-EN 12186. 7.2). Inhibiittorin injektointi kaasun joukkoon on käytännössä kuitenkin erittäin harvinainen ja vähän käytetty menetelmä.

### 2.2.4 Paineensäätöventtiili

Paineensäätöventtiilien rakenteet ja toimintaperiaatteet ovat valmistajakohtaisia, mutta yleisesti laiterungossa tulopaineen ollessa 4-8 bar on paineensäätimen lisäksi muitakin laitteita, kuten turvasulku- ja apuvaroventtiilit sekä painemittaus. (Riikonen. Julkaisu M5. 1998. s.15). Yleensä siirtoputkistojen yhteydessä olevissa paineensäätimissä on lisänä vain turvasulkuventtiili. Kuvasta 5 nähdään periaatekuva paineensäätimestä.



**Kuva 5.** Paineensäädin (Maakaasukäsikirja 2010. s.60)

Yksinkertaisimmillaan paineensäätöventtiili on jousivoimaviritteinen paineensäädin, jota ohjaa venttiililtä lähtevän putkiston säätöpaine. Kohteissa, joissa kaasun virtaus vaihtelee laajalla alueella tai joissa on suuria paine-eroja, käytetään pilottiohjattua paineensäätöventtiiliä. Pilottiohjatulla paineensäätöventtiilillä tarkoitetaan sellaista venttiiliä, jossa varsinaista paineensäätöventtiiliä ohjataan toisella huomattavasti pienemmällä paineensäätöventtiilillä eli pilottiventtiilillä. Pilottiventtiiliä ohjaa säätöventtiililtä lähtevän kaasuputkiston säätöpaine ja pilottiventtiili säätelee varsinaisen venttiilin kalvokammion työpainetta. Työpaineen ollessa suurempi kuin kaasuputkiston

säätöpaine saadaan säätöventtiili reagoimaan kaasuvirran muutoksiin herkemmin ja tarkemmin. (Riikonen. 1998. s.15-16.)

### 2.2.5 Kaasumäärän mittaaminen

Paineensäätölaitteiston ja turvalaitteiden lisäksi paineenvähennysasemalla on kaasumäärämittari. Kaasumäärän mittaaminen perustuu virtaavan maakaasun tilavuusvirran mittaamiseen. Mittaamiseen käytetään kahta eri menetelmää, suoraa tilavuusmittausta tai epäsuoraa tilavuusmittausta. Molemmissa mittausmenetelmissä on olemassa lukuisia eri mittarityyppejä, joista osa soveltuu paremmin korkeisiin paineisiin ja suuriin tilavuusvirtoihin ja toiset taas pääsevät tarkempiin tuloksiin matalilla tilavuusvirroilla. (Riikonen. 1998. s.24-33.)

Suoralla tilavuusmittauksella tarkoitetaan sitä, että kaasu johdetaan tilaan, jonka tilavuus tiedetään tarkasti. Kaasumäärä saadaan selville laskemalla tilan tyhjennysvaiheiden lukumäärä. Tällä periaatteella toimivat muun muassa palje ja kiertomäntämittarit. (Riikonen. 1998. s.26.)

Epäsuorassa tilavuusmittauksessa ei tutkita suoraan tilavuudenmuutoksia, vaan seurataan jotakin kaasuvirtauksen synnyttämää fysikaalista suureta, jonka suhde tilavuusvirtaan tiedetään. Tämän suhteen avulla saadaan laskettua virtaava kaasumäärä. Tällä periaatteella toimii esimerkiksi turbiinimittari, jossa kaasuvirran aikaansaamaa turbiinin pyörimisnopeutta seuraamalla saadaan laskettua kaasun tilavuusvirta. (Riikonen. 1998. s.26.) Turbiinimittari on yleisin kaasumäärän mittaamiseen käytetty mittarityyppi maakaasun siirtoputkiston yhteydessä olevilla paineenvähennysasemilla.

## 2.3 Kaasun virtaus putkistossa

Maakaasua kuljetetaan putkikuljetuksena tuotantolähteiltä kulutusalueille. Kaasun virratessa kaasuputkistossa on kyseessä paisuntavirtaus, koska paine alenee virtaussuunnassa kitkahäviöiden takia. Kaasun käyttäytymisen selvittämiseksi kaasuputkistossa ja paineenvähennysasemilla täytyy tietää kaasun fysikaalinen olotila, mikä on kolmen perussuureen funktio. Nämä suureet ovat paine, lämpötila ja kaasun, tässä

tapauksessa kaasuseoksen, tiheys. Kaasuvirran ominaisuuksien kuvaukseen tarvitaan myös muita muuttujia kuvaamaan sen liikettä kuten tilavuus- tai massavirtaa sekä virtausnopeutta. (Bohl. 1988. s.171.)

Kaasun ollessa kokoonpuristuvaa, ei paineen aleneminen tapahdu lineaarisesti, eikä virtausnopeus pysy vakiona. Potentiaalienergian muutos voidaan jättää kaasuvirtauksissa paine- ja nopeusenergian rinnalla huomiotta. Virtauksen edetessä putkistossa muodostuva paineen ja nopeuden muutos riippuu paisunnan laadusta sekä kitkan vaikutuksesta. (Bohl. 1988. s.171.)

Paine on puristusjännitystä tietyssä pisteessä ja se on virtausnopeuden kanssa muuttuvin suure virtausmekaniikassa. Paine-erot saavat aikaan virtauksen putkistossa. (White. 2003. s.17). Kaasuputkistot suunnitellaan toimimaan tietyllä nimellispaineella tai -painevälillä. Tämä paine on aina korkeampi, kuin paikallinen ilmanpaine. Yleisesti ottaen mitä suurempi määrä kaasua tarvitsee siirtää, sitä korkeampi on nimellispaineen oltava putkistoa suunniteltaessa. Putkistot suunnitellaan rajoitetulla, suhteessa alhaisella vahvasti alikriittisellä alueella olevalla kaasun virtausnopeudella. Alikriittisellä alueella tarkoitetaan sitä, että kaasun virtausnopeus on tuntuvasti alhaisempi, kuin ääniaaltojen etenemisnopeus kaasussa. (Králik et al. 1988. s.54.)

Lämpötila liittyy vahvasti virtaaman sisäiseen energiatasoon. (White. 2003. s.17). Suomessa virtaavan maakaasun lämpötila on heti kompressoriaseman jälkeen +35 °C ja paineenvähennysasemalta lähtevän lämmitetyn maakaasun lämpötila on 10-15 °C. Putkistossa virtaavan maakaasun lämpötila vakaantuu vähitellen putkistoa ympäröivän maan lämpötilaan, joka on noin 0 °C, ja koska putkistojen asennussyvyys on yli 1 metriä maanpinnan alapuolella, ei ympäröivässä maamassassa tapahdu juurikaan lämpötilanvaihteluja. (Králik et al. 1988. s.78).

Lämpötilan muutokset aiheuttavat muutoksia kaasun käytöksessä putkistossa. Lämpötilan kohotessa putkistossa virtaava kaasukapasiteetti alenee ja vaatimukset rakenneosille kasvavat. Lämpötilan laskiessa ilmenee putkistossa vesihöyryn kondensoitumista sekä hydraatin muodostumista. Tästä voi seurata vaara putkikirikolle putkiston osien korroosion sekä hydraattien aiheuttamien tukkeutumien vuoksi. Lämpötilan muutoksia tapahtuu

pääasiassa vain kaasun paineen muuttuessa paineenvähennys- ja kompressoriasemilla. Tätä varten muun muassa paineenvähennysasemilla, joissa kaasun painetta alennetaan, ovat lämmönvaihtimet pitämässä kaasun lämpötila halutulla alueella. (Králik et al. 1988. s.55.)

Maakaasun ollessa reaalikaasuseos, jossa on monia eri kaasuja, tarvitsee sen tarkemman käyttäytymisen selvittämiseksi selvittää myös kaasuseoksen kokoonpuristuvuuskerroin sekä viskositeetti. Maakaasu koostuu pääasiassa metaanista sekä pienistä määristä etaania, propaania, butaania ja typpeä. Suomeen tuotavan Venäjän Siperiasta lähtöisin olevan maakaasun koostumus on taulukon 3 mukainen.

**Taulukko 3.** Suomeen tuotavan maakaasun koostumus (Gasum Oy. 2012.)

Metaania CH <sub>4</sub>	> 98 til-%
Etaania C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	< 1 til-%
Propaania ja muita hiilivetyjä C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> , C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	< 0,5 til-%
Typpeä N <sub>2</sub>	< 1 til-%

#### 2.4 Kaasun tilanyhtälöt

Boylen lain mukaan kaasun lämpötilan pysyessä vakiona kaasun tilavuus muuttuu kääntäen verrannollisesti kaasun paineeseen nähden yhtälön 1 mukaisesti. Boylen lain mukaisesti kaasun tilavuus siis pienenee paineen kasvaessa ja vastaavasti paineen laskiessa tilavuus kasvaa.

$$P_1V_1 = P_2V_2, \quad (1)$$

missä  $P_1$  on paine ja  $V_1$  on tilavuus alkutilassa ja vastaavasti  $P_2$  on paine ja  $V_2$  on tilavuus lopputilassa.

Charlesin lain mukaan sekä paine että tilavuus kasvavat suoraan verrannollisesti lämpötilan kasvaessa yhtälöiden 2 ja 3 mukaisesti. Lämpötilan kasvaessa paine sekä tilavuus kasvavat samassa suhteessa.

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}, \quad (2)$$

missä  $V_1$  on tilavuus ja  $T_1$  on lämpötila alkutilassa ja  $V_2$  on tilavuus ja  $T_2$  on lämpötila lopputilassa.

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2}, \quad (3)$$

missä  $P_1$  on paine ja  $T_1$  on lämpötila alkutilassa ja  $P_2$  on paine ja  $T_2$  on lämpötila lopputilassa.

Boylen ja Charlesin lait voidaan yhdistää, jolloin saadaan yhtälön 4 mukainen yhtälö.

$$\frac{PV}{T} = \text{vakio} \quad (4)$$

Yhtälössä 4 oleva vakio ei ole riippuvainen kaasun tilasta, vaan kaasun ominaisuuksista ja se tunnetaan paremmin kaasuvakiona. Kaasuvakion tunnuksena käytetään kirjainta  $R$  ja näin ideaalikaasujen tilanyhtälö voidaan kirjoittaa yhtälön 5 mukaisesti. (Osiadacz. 1987. s.5.)

$$\frac{P}{\rho} = PV = RT, \quad (5)$$

missä  $P$  on paine,  $\rho$  on tiheys,  $V$  on tilavuus,  $R$  on kaasuvakio ja  $T$  on lämpötila.

## 2.5 Kaasun kokoonpuristuvuus

Maakaasu on sekoitus monia eri reaalikaasuja. Reaalikaasuilla tilanyhtälö eroaa hieman yhtälössä 5 esitetystä ideaalikaasujen tilanyhtälöstä. Reaalikaasuilla ideaalikaasujen tilanyhtälöön lisätään kokoonpuristuvuuskerroin  $z$ , jolloin tilanyhtälöstä tulee yhtälön 6 mukainen.

$$\frac{P}{\rho} = PV = zRT \quad (6)$$

missä  $z$  on kaasun kokoonpuristuvuuskerroin.

Kaasun kokoonpuristuvuuskerroin on empiirisesti selvitetty funktio muista tilanmuuttujista ja on näin riippuvainen reaalikaasun fysikaalis-kemiallisominaisuuksista, paineesta sekä lämpötilasta. Kokoonpuristuvuuskerroimen määrittäminen yksittäiselle reaalikaasulle on helpompaa, kuin kaasuseokselle kuten maakaasulle, joka sisältää monia eri reaalikaasuja. Tarkkaa teoreettista määritelmää ei kokoonpuristuvuuskerroimelle ole. Kerroimen määrittämiseen on kuitenkin olemassa useita empiirisesti selvitettyjä yhtälöitä, joilla päästään riittävään tarkkuuteen. Yleisin käytetty kokoonpuristuvuuskerroimen yhtälö on, Králik et alin mukaan, American Gas Associationin laatima yhtälö, joka on yhtälön 7 mukainen. (Králik et al. 1988. s.57.)

$$z = 1 + aP + b\frac{P}{T}, \quad (7)$$

missä  $a$  on  $\frac{0,257}{P_{kri}}$  ja  $b$  on  $\frac{-0,533T_{kri}}{P_{kri}}$ .

Yhtälössä 7  $P_{kri}$  tarkoittaa kriittistä painetta, joka on se paine, jossa kaasu nesteytyy kriittisessä lämpötilassa  $T_{kri}$ . Kriittinen lämpötila on korkein lämpötila, jossa kaasu on mahdollista nesteyttää. Tämän lämpötilan yläpuolella ei ole enää mahdollista nesteyttää kaasua. Suomeen tuotavalla maakaasulla kriittinen lämpötila on  $-82\text{ °C}$  ja kriittinen paine on 46 bar. (Gasum Oy. 2012.).

Maakaasun ollessa kokoonpuristuvaa, muuttuu sen tiheys paineen muuttuessa. Normaaliolosuhteissa, kun paine on 1,01325 bar ja lämpötila  $0\text{ °C}$  Suomeen tuotavan maakaasun tiheys on  $0,72\text{ kg/m}^3$ . Paineen sekä lämpötilan aiheuttama tiheydenmuutos saadaan laskettua yhtälön 8 avulla.

$$\rho = \frac{MP}{zRT}, \quad (8)$$

missä  $M$  on maakaasun moolimassa, joka Suomeen tuotavalla maakaasulla on 16,0 kg/mol,  $P$  on paine,  $R$  on yleinen kaasuvakio,  $T$  on kaasun lämpötila ja  $z$  on kaasun kokoonpuristumiskerroin.

## 2.6 Viskositeetti

Kokoonpuristuvuuskertoimen ohella maakaasun viskositeetilla on iso vaikutus analysoitaessa kaasuvirtausta putkistossa. Samoin kuin kokoonpuristuvuuskertoimen, niin myös viskositeetin tarkka määrittäminen kaasuseoksille on hankalaa. (Králik et al. 1988. s.57). Viskositeetilla tarkoitetaan suuretta, joka kuvaa virtaavan aineen, tässä tapauksessa maakaasun, kykyä vastustaa virtaamista. (White. 2003. s.23).

Viskositeetti jaetaan kahteen osaan, dynaamiseen ja kinemaattiseen viskositeettiin. Dynaaminen viskositeetti on yhtälön 9 mukaisesti leikkausjännityksen ja leikkausnopeuden välinen suhde. Kinemaattinen viskositeetti on yhtälön 10 mukaisesti dynaamisen viskositeetti jaettuna virtaavan aineen tiheydellä. Kaasuilla matalilla paineilla lämpötilan noustessa viskositeetti kasvaa ja korkeissa paineissa viskositeetti laskee. (Biotekniikan ja kemian tekniikan laitos. 2012. s.7.) Suomeen tulevan maakaasun dynaaminen viskositeetti 20 °C lämpötilassa ja 1,01325 barin paineessa on  $11,0 \cdot 10^{-6}$  kg/ms ja kinemaattinen viskositeetti 20 °C lämpötilassa on  $16,7 \cdot 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s. (Gasum Oy. 2012).

$$\tau = \eta \frac{\partial v}{\partial y}, \quad (9)$$

missä  $\tau$  on leikkausjännitys,  $\eta$  on dynaaminen viskositeetti ja  $\frac{\partial v}{\partial y}$  on nopeusgradientti, eli nopeuden muutos paikan suhteen.

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}, \quad (10)$$

missä  $\nu$  on kinemaattinen viskositeetti,  $\rho$  on tiheys ja  $\eta$  on dynaaminen viskositeetti.



## 2.7 Virtausmuodot

Virtaukset voidaan jakaa eri ryhmiin niiden virtausmuotojen perusteella. Eri virtausmuotoja ovat laminaarinen ja turbulenttinen virtaus. Virtausmuotojen määrittäminen tapahtuu Reynoldsin luvun perusteella. Virtaukset, joissa Reynoldsin luku jää kriittisen rajan alle, joka on 2320, ovat laminaarisia ja ylimenevät ovat turbulenttisia virtauksia. (Bohl. 1988. s.87.) Käytännössä virtaus ei ole vielä täysin turbulenttinen heti kriittisen rajan yläpuolella, vaan siitä alkaa muutos laminaarisesta virtauksesta turbulenttiseen. Täysin turbulenttiseksi virtausta voidaan sanoa Reynoldsin luvun ollessa yli 10 000. (White. 2003. s.346.)

Laminaarisessa virtauksessa virtausosaset liikkuvat kerroksittain pitkin putken pituusakselin suuntaisia virtaviivoja, eivätkä sekoitu keskenään. Turbulenttisessa virtauksessa esiintyy pyörteitä, jolloin virtausosaset sekoittuvat keskenään. (Bohl. 1988. s.85.) Käytännössä laminaarinen virtaus on harvinaista kaasuputkistossa, sillä se vaatii suhteessa matalan virtausnopeuden. (von Günter et al. 1982. s.103).

Reynoldsin luku on dimensioton suure, joka kuvaa virtauksen virtausosasiin vaikuttavien inertiaivoimien eli hitausvoimien ja viskositeettivoimien suhteen. Se on riippuvainen virtausaineen ominaisuuksista, nopeudesta sekä putken halkaisijasta. Reynoldsin luku voidaan määrittää yhtälön 11 tavoin. (Osiadacz. 1987. s.9.)

$$Re = \frac{Dw}{\nu} = \frac{Dw\rho}{\eta}, \quad (11)$$

missä  $D$  on putken halkaisija,  $w$  on virtausnopeus,  $\nu$  on kinemaattinen viskositeetti,  $\eta$  on dynaaminen viskositeetti ja  $\rho$  on tiheys.

### 2.7.1 Virtausvastuskerroin

Virtausvastuskerroin on riippuvainen Reynoldsin luvusta. Virtausvastuskerroin määritellään eri tavalla laminaariselle sekä turbulenttiselle virtaukselle. Laminaariselle virtaukselle eli Reynoldsin luvun ollessa alle kriittisen rajan ( $Re < 2320$ )

virtausvastuskertoimen määrittäminen on helppoa. Laminaariselle virtaukselle virtausvastuskerroin määritellään yhtälön 12 tavoin. (Králik et al. 1988. s.284)

$$\lambda = \frac{64\eta}{w\rho D} = \frac{64}{Re}, \quad (12)$$

missä  $\eta$  on dynaaminen viskositeetti,  $w$  on virtausnopeus,  $\rho$  on tiheys,  $D$  on putken halkaisija ja  $Re$  on Reynoldsin luku.

Turbulenttiselle virtaukselle ( $Re > 2320$ ) virtausvastuskertoimen määrittäminen ei ole niin yksinkertaista kuin laminaariselle virtaukselle. Turbulenttisen virtauksen virtausvastuskerroin on saatu selvitettyä empiiristen kokeiden avulla, ja tästä syystä virtausvastuskertoimelle löytyykin muutamia hieman toisistaan poikkeavia määritelmiä. Králik et al julkaisussaan Dynamic modeling of large-scale networks with application to gas distribution ovat tutkineet eri määritelmiä virtausvastuskertoimelle. Heidän mukaan paras approksimaatio virtausvastuskertoimen määrittämiseksi turbulenttisessa virtauksessa on yhtälön 13 mukainen. (Králik et al. 1988. s.286)

$$\lambda^{-1/2} = -2\log\left(\frac{4,518}{Re}\log\frac{Re}{7} + \frac{k}{3710D}\right), \quad (13)$$

missä  $\lambda$  on virtausvastuskerroin,  $k$  on putken sisäpinnan karheus ja  $D$  on putken halkaisija.

## 2.8 Putkiston sisäpinnan karheus

Putkiston sisäpinnan karheus vaikuttaa kaasun virtaukseen putkistossa. Pinnankarheus kuvaa paikallisesti putkiston sisäpinnan laatua. Karheutta voidaan kuvailla numeerisesti pinnan epätasaisuuden avulla. Pinnankarheus on merkittävä tekijä kaasuputkistoa suunniteltaessa ja virtaavaa kaasumäärää laskettaessa sillä pinnankarheus on yksi hydraulisen vastuskertoimen perussuure. Pinnankarheus on muuttuva, eikä se välttämättä ole täysin sama koko putken sisäpinnalla. Tästä syystä voidaan käyttää ekvivalenttista karheutta ilmaisemaan pinnankarheutta. Ekvivalenttisella karheudella tarkoitetaan keskimääräistä epätasaisuutta pinnalla tietyllä pituusyksiköllä. Ekvivalentti karheus sisältää

muun muassa myös paikalliset eroavuudet pinnanmuodoissa, kuten valmistustoleranssit, putkien liitoskohdat ja pienet kaareutumaiset putkistoissa. (Králik et al. 1988. s.61.)

## 2.9 Kaasuverkoston jako elementteihin

Kaasuverkosto voidaan jakaa osiin, putkielementteihin ja ei-putkielementteihin, joita ovat muun muassa venttiilit, kuristimet ja paineensäätimet. Yleisin ei-putkielementti kaasuverkossa on venttiili. Venttiilin perustehtävä riippumatta sen rakenteesta on kaksivaiheinen, joko avautua tai sulkeutua. Avoimena venttiili ei rajoita kaasun virtausta ollenkaan, eli virtaavan kaasun tilanmuuttujien arvot sekä virtausmäärät ovat samat venttiilin molemmilla puolilla. Vastaavasti venttiilin ollessa suljettuna sen läpi ei virtaa kaasua, vaan virtausmäärä sisään että ulos venttiilistä on nolla. Paineensäätimiä käytetään muun muassa paineenvähennysasemilla. Säätimien tehtävä on paineensäätö ja -alennus. Paineensäätimelle tulevan paineen ollessa yhtä suuri kuin paineensäätimeltä lähtevä paine, toimii paineensäädin avoimen venttiilin tavoin. (Králik et al. 1988. s.63–64.)

## 2.10 Mekaniikan peruslait virtauksessa

Maakaasun, kuten kaikkien muidenkin aineiden, virtaus putkistossa tapahtuu kolmen mekaniikan peruslain mukaisesti. Nämä lait ovat massan säilymlaki, Newtonin toinen laki ja energian säilymlaki. (White. 2003. s.38.)

### 2.10.1 Massan säilymlaki

Putkivirtauksessa massaa ei tule lisää, eikä sitä myöskään poistuu. Tämän vuoksi massan säilymlain perusteella sisääntulevan ja uloslähtevän massavirran on oltava yhtä suuria kuin massan muutoksen putkielementissä ajan suhteen yhtälön 13 mukaisesti. (Králik et al. 1988. s.71.)

$$M - \left( M + \frac{\partial M}{\partial x} dx \right) = \frac{\partial dG}{\partial t}, \quad (13)$$

missä  $M$  on massavirta,  $\frac{\partial M}{\partial x} dx$  on massavirran muutos paikan suhteen,  $G$  on massa ja  $\frac{\partial G}{\partial t}$  on massan muutos ajan suhteen.

Yhtälössä 13 oleva massa voidaan kirjoittaa auki yhtälön 14 mukaisesti ja yhtälö 13 lausua uudelleen yhtälön 15 mukaisesti.

$$dG = S\rho dx, \quad (14)$$

missä  $S$  on putken poikkileikkauksen pinta-ala.

$$\frac{\partial M}{\partial x} + S \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (15)$$

missä  $\frac{\partial M}{\partial x}$  on massavirran muutos paikan suhteen ja  $\frac{\partial \rho}{\partial t}$  on liikemäärän muutos ajan suhteen.

### 2.10.2 Newtonin toinen laki

Newtonin toisen lain mukaan kappaleeseen vaikuttavien voimien summa on yhtä suuri kuin liikemäärän muutos ajan suhteen yhtälön 16 mukaisesti. (Králik et al. 1988. s.72.)

$$-\frac{\partial P}{\partial x} - g\rho \frac{dh}{dx} - f_R = \rho \frac{dw}{dt}, \quad (16)$$

missä  $\frac{dw}{dt} = \frac{\partial w}{\partial t} + w \frac{\partial w}{\partial x}$ , missä  $\frac{\partial P}{\partial x}$  kuvaa paineen muutos paikan suhteen,  $g\rho \frac{dh}{dx}$  kuvaa gravitaatiovoiman vaikutusta kaasun liikkeeseen,  $f_R$  on vastusvoima ja  $\rho \frac{dw}{dt}$  kuvaa liikemäärän muutosta ajan suhteen.

Yhtälössä 16 oleva vastusvoima  $f_R$  voidaan avata yhtälön 17 mukaiseen muotoon.

$$f_R = \frac{\lambda |w| w}{2D} \rho, \quad (17)$$

missä  $w$  on virtausnopeus,  $\lambda$  on hydraulinen virtausvastus  $D$  on putken sisähalkaisija ja  $\rho$  on tiheys.

Yhtälössä 17 oleva nopeus  $w$  voidaan kirjoittaa myös muotoon

$$w = \frac{M}{S\rho},$$

jolloin vastusvoiman yhtälö 17 voidaan kirjoittaa yhtälön 18 mukaisesti.

$$f_R = \frac{\lambda}{2DS^2} \frac{M|M|}{\rho}, \quad (18)$$

missä  $\lambda$  on hydraulinen virtausvastus,  $D$  on putken halkaisija,  $S$  on poikkileikkauksen pinta-ala  $M$  on massavirta ja  $\rho$  on tiheys.

Sijoittamalla vastusvoiman yhtälö 18 Newtonin liikeyhtälöön 16 tulee siitä yhtälön 19 mukainen.

$$\frac{\partial P}{\partial x} + g\rho \frac{dh}{dx} + \frac{\lambda}{2DS^2} \frac{M|M|}{\rho} = -\rho \frac{dw}{dt} \quad (19)$$

Yhtälön 19 toinen termi kuvaa gravitaatiovoiman vaikutusta kaasun liikkeeseen. Toiseen termiin voitaisiin myös sisällyttää coriolisvoiman vaikutus, mutta tämän mittakaavan systeemeissä sen vaikutus on olematon. (Králik et al. 1988. s.74, White. 2003. s.164.)

### 2.10.3 Energian säilymlaki

Termodynamiikan ensimmäinen laki eli energiayhtälö tarvitaan kuvaamaan energian säilymistä putkielementeissä. Energian säilymisyhtälön selvittäminen tällaiselle verkostolle, millainen kaasuputkiverkosto on, on vaikeaa. Tästä syystä voidaan käyttää energiayhtälön sijaan virtaavan kaasun tilan muutoksia kuvaavaa yhtälöä. Usein tilan muutokset sisällytetään polytrooppisiin muutoksiin polytrooppisen eksponentin ollessa lähellä yhtä. (Králik et al. 1988. s.77.) Polytrooppisen eksponentin ollessa yksi, on virtaus isoterminen. Tämä tulkinta vastaa hyvin reaalitilannetta, sillä kaasun lämpötila tasaantuu

virtauksen edetessä vähitellen ympäristön lämpötilaan paljaan eristämättömän maanalaisen putken seinämän läpi, jolloin virtausta voidaan kutsua isotermiseksi. (Bohl. 1988. s.171).

Kokonaisenergia koostuu sisäenergiasta ja kineettisestä energiasta, mitkä vastaavat lämmön määrää ja tehtyä työtä systeemissä. Energiatasapaino voidaan lausua yhtälön 20 tavoin. (El Golli et al. 2006. s.4.)

$$\rho \left( \frac{\partial e}{\partial t} + w \frac{\partial w}{\partial x} \right) = - \frac{\partial Pw}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{ij}w}{\partial x} - \frac{\partial \varphi}{\partial x}, \quad (20)$$

missä  $e$  on systeemin sisäenergia,  $w$  on virtausnopeus,  $\tau_{ij}$  on leikkausjännitys,  $\varphi$  on lämpövirta ja  $x$  on sijainti putken pituuden suuntaisesti.

Lisäämällä yhtälöön 20 kineettisen energian yhtälön tulee siitä yhtälön 21 mukainen.

$$\rho \left( \frac{\partial e}{\partial t} \right) = -w \frac{\partial P}{\partial x} + \tau_{ij} \frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\partial \varphi}{\partial x} \quad (21)$$

Sisäenergia  $e$  voidaan entalpian avulla kirjoittaa yhtälön 22 mukaiseen muotoon.

$$e = h + \frac{P}{\rho} \quad \text{ja}$$

$$dh = de - d \left( \frac{P}{\rho} \right) = C_p dT + (1 - T\beta) dP, \quad (22)$$

missä  $C_p$  on lämpökapasiteetti  $T$  on lämpötila ja  $\beta$  on lämpölaajenemiskerroin, joka voidaan avata yhtälön 23 tavoin.

$$\beta = - \frac{1}{\rho} \left( \frac{d\rho}{dT} \right)_P \quad (23)$$

Yleinen energiayhtälö voidaan kirjoittaa yhtälön 24 mukaisesti.

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + w \frac{\partial T}{\partial x} \right) = - \frac{\partial \varphi}{\partial x} + T\beta \frac{dP}{dt} + \tau_{ij} \frac{\partial w}{\partial x}, \quad (24)$$

missä  $C_p$  on lämpökapasiteetti ja  $T$  on lämpötila.

Králik et al ehdottavat, että kaikki tilanmuutokset ajan suhteen ajatellaan isotermisenä ja lämpötila pituuden funktiona. Näin saadaan eliminoitua vaikea energian tasapainoyhtälön tarve. Energiayhtälö voidaan näin korvata lämpötilan eksponentiaalisella jakaumalla putken pituuden suhteen yhtälön 25 mukaisesti. (Králik et al. 1988. s.77.)

$$T(x) = T_E + \frac{T(0)-T_E}{Cx} (1 - e^{-Cx}), \quad (25)$$

missä  $T_E$  on ympäristön lämpötila ja  $C$  on vakio, joka sisältää lämmönsiirron keskiarvo kertoimen kaasun ja ympäristön välillä.

Yhtälö 25 soveltuu lähinnä yksinkertaisten putkilinjojen analysointiin ja suunnitteluun. Suuremman mittakaavan putkiverkoston analysoinnissa tulisi vastaan ongelmia, sillä esimerkiksi ympäristön lämpötila vaihtelee hiukan alueittain. Yhtälö soveltuu kuitenkin esimerkiksi kompressori- ja paineenvähennysasemien läheisyydessä olevien putkilinjojen tarkasteluun.

## 2.11 Maakaasuputkiston ja paineenvähennysaseman mitoitusperiaatteet

Maakaasuputken ja paineenvähennysaseman mitoitus perustuu normaalisti välitettävään ainemäärään, painetasoon, painehäviöön sekä putkiston pituuteen. Usein putkistojen ja paineenvähennysasemien mitoitukset tehdään kokemukseen perustuen, jonka jälkeen tarkistetaan, että mitoitukset täyttävät kriteerit sekä kuinka suuri painehäviö kaasuvirtaamalla tapahtuu. Mitoitus voidaan tehdä myös toisin päin valitun putkiston sallitulla painehäviöllä antama kaasumäärä ja verrata saatua tulosta haluttuun kaasumäärään. (Riikonen. 1998. s.35.)

Putkistoa ja paineenvähennysasemaa mitoittaessa mitoittavana kaasumääränä käytetään sitä yhteistehoa, jossa kaikkien kaasua käyttävien laitteiden käyttämä kaasumäärä on laskettu yhteen. (Riikonen. 1998. s.35.) Lisäksi putkistot täytyy suunnitella siten, että

kaasun virtausnopeus ei ylitä 20 m/s mittaus- ja säätöjärjestelmissä eroosion sekä virtauksen aiheuttaman melun ja värähtelyn estämiseksi. (SFS-EN 15001-1. 6.3.2).

### 2.11.1 Painehäviö

Maakaasuputkiston mitoituksessa painehäviö on merkittävä mitoituskriteeri. Painehäviön syntyyn putkistossa vaikuttaa muun muassa seuraavat asiat:

- virtaavan kaasun aineominaisuudet
- virtausmäärä ja -nopeus
- lähtöpaine
- putken rakenne ja materiaali
- putken sijainti ja korkeuserot
- putken pituus
- virtausvastuksia aiheuttavat varusteet ja laitteet
- putkikoko
- kaasun lämpötila

Täysin tarkka painehäviön laskenta on harvoin perusteltua, sillä se on verrattain hankalaa maakaasun ollessa kokoonpuristuvaa. Painehäviön laskennan yksinkertaistamiseksi voidaan kaasuvirran olettaa olevan vakaa, jolloin virtaus ei muutu ajan suhteen. (Králik et al. 1988. s.282.) Näin voidaankin kohdassa 2.10.2. esitetty jatkuvuusyhtälö 19 kirjoittaa yhtälön 26 mukaiseen muotoon.

$$\frac{\partial \rho w}{\partial x} = 0, \quad (26)$$

missä  $\rho$  on kaasun tiheys ja  $w$  on kaasun virtausnopeus.

Yhtälön 26 perusteella voidaan myös sanoa, että  $\frac{\partial M}{\partial x} = 0$ , jolloin jatkuvuusyhtälö voidaan ilmaista myös yhtälön 27 mukaisesti.

$$\sum M_{IN} - \sum M_{OUT} = 0, \quad (27)$$



missä  $M_{IN}$  on putkistoon tuleva massavirta ja  $M_{OUT}$  on putkistosta lähtevä massavirta.

Kohdassa 2.10.2 esitetty jatkuvuusyhtälö voidaan myös kirjoittaa yhtälön 28 mukaiseen muotoon.

$$\frac{\partial P}{\partial x} = -g\rho \frac{dh}{dx} - \frac{\lambda}{2DS^2} \frac{|M|M}{\rho} - \rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + w \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (28)$$

Yhtälöstä 28 voidaan jättää termi  $\frac{\partial \rho w^2}{\partial x}$  huomiotta, sillä sen vaikutus on olematon. (Králik et al. 1988. s.283). Sijoittamalla yhtälöön myös tiheyden yhtälön  $\rho = \frac{P}{zRT}$  tulee siitä yhtälön 29 mukainen.

$$\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\lambda zRT|M|M}{2PS^2D} + g \frac{P}{zRT} \frac{dh}{dx} = 0, \quad (29)$$

missä  $\frac{\partial P}{\partial x}$  kuvaa paineen muutosta paikan suhteen,  $\lambda$  on hydraulinen virtausvastus,  $z$  on kokoonpuristuvuuskerroin,  $R$  on yleinen kaasuvakio,  $T$  on lämpötila,  $M$  on kaasun massavirta,  $P$  on paine,  $S$  on putken poikkipinta-ala  $g$  on putoamiskiihtyvyys ja termi  $\frac{dh}{dx}$  kuvaa korkeuden muutoksia pituuden suhteen putkessa.

Putken ollessa vaakatasossa, jolloin korkeuden muutoksia pituuden suhteen ei tapahdu, voidaan yhtälössä 29 oleva termi  $\frac{dh}{dx}$  asettaa nolaksi, jolloin yhtälöstä 29 tulee integroinnin jälkeen yhtälön 30 mukainen.

$$P_{IN}^2 - P_{OUT}^2 = \frac{\lambda zRT|M|ML}{DS^2}, \quad (30)$$

missä  $P_{IN}$  on tulopaine putkistoon,  $P_{OUT}$  on lähtöpaine putkistosta ja  $L$  on putken pituus.

Kaltevissa putkissa, joissa korkeus muuttuu pituuden suhteen, eikä siis termi  $\frac{dh}{dx}$  ole nolla, yhtälöstä 29 tulee integroinnin jälkeen yhtälön 31 mukainen.

$$P_{IN}^2 - P_{OUT}^2 = \frac{\lambda z RT |M| M e^a - 1}{DS^2} a, \quad (31)$$

missä  $a = \frac{2g\Delta h}{zRT}$  ja  $\Delta h$  on korkeuden muutos.

Yhtälössä 31 esiintyvä termi  $e^a$  voidaan avata Maclaurin sarjan avulla muotoon

$e^a = 1 + \frac{a}{1!} + \frac{a^2}{2!}$ , jolloin yhtälö 31 voidaan kirjoittaa yhtälön 32 tavoin.

$$P_{IN}^2 - P_{OUT}^2 = \frac{\lambda z RT |M| M}{DS^2} \left(1 + \frac{a}{2}\right) + P_{OUT}^2 a \left(1 + \frac{a}{2}\right) \quad (32)$$

Yhtälöstä 32 saadaan laskettua putkistosta ulostuleva paine  $P_{OUT}$  yhtälön 33 mukaisesti.

$$P_{OUT} = \sqrt{\frac{P_{IN}^2 - \frac{\lambda z RT |M| M L}{DS^2} \left(1 + \frac{a}{2}\right)}{1 + a \left(1 + \frac{a}{2}\right)}}, \quad (33)$$

missä  $\lambda$  on virtausvastuskerroin,  $z$  on kokoonpuristuvuuskerroin,  $M$  on massavirta,  $L$  on putkiston pituus,  $D$  on putkiston sisähalkaisija ja  $S$  on putkiston poikkipinnan pinta-ala.

Myös massavirta saadaan laskettua yhtälön 32 avulla yhtälön 34 tavoin.

$$|M| = \sqrt{\frac{|P_{IN}^2 - P_{OUT}^2 [1 + a \left(1 + \frac{a}{2}\right)]|}{\frac{\lambda z RT}{DS^2} \left(1 + \frac{a}{2}\right)}} \quad (34)$$

### 2.11.2 Kaasuvirran nopeus ja tilavuusvirta putkistossa

Kaasuvirran nopeus putkistossa on paineen kanssa yksi muuttuvimmista suureista virtausmekaniikassa. Kaasun kokoonpuristuvuudesta johtuen paineen aleneminen putkistossa ei tapahdu lineaarisesti eikä myöskään virtausnopeus pysy vakiona. (Bohl. 1988. s.171, White. 2003. s.17.) Kaasuvirran keskinopeus saadaan laskettua yhtälön 35 mukaisesti.

$$\tilde{W}_0 = \frac{(M_{IN\ 0} + M_{OUT\ 0})\tilde{z}_0 R \tilde{T}_0}{(P_{IN\ 0} + P_{OUT\ 0})S} = \frac{\tilde{M}_0 \tilde{z}_0 R \tilde{T}_0}{\tilde{P}_0 S}, \quad (35)$$

missä  $\tilde{M}_0$  on keskimääräinen massavirta,  $\tilde{z}_0$  on keskimääräinen kokoonpuristuvuuskerroin,  $R$  on kaasuvakio,  $\tilde{T}_0$  on keskilämpötila,  $\tilde{P}_0$  on keskipaine ja  $S$  on putken poikkipinta-ala.

Kaasuvirran hetkellinen nopeus tietyssä kohtaa saadaan laskettua vastaavasti kuin kaasuvirran keskinopeus putkistossa. Hetkellinen nopeus lasketaan yhtälön 36 mukaisesti. (Králik et al. 1988. s.86.)

$$w_0(x) = \frac{M_0 z_0 R T_0}{S P_0}, \quad (36)$$

missä  $M_0$  on massavirta,  $z_0$  on kokoonpuristuvuuskerroin,  $R$  on kaasuvakio,  $T_0$  on kaasun lämpötila,  $P_0$  on paine ja  $S$  on putken poikkipinta-ala. Alaindeksi  $_0$  kuvaa suureen arvoa tietyssä kohdassa.

Yksinkertaistetusti kaasuvirran nopeus saadaan laskettua kaasun tilavuusvirran avulla yhtälön 37 mukaisesti.

$$w = \frac{Q}{S}, \quad (37)$$

missä  $Q$  on kaasun tilavuusvirta ja  $S$  on putken poikkipinta-ala.

Kaasun tilavuusvirralla tarkoitetaan tietyn pinta-alan läpi tietyssä ajassa virtaavan kaasun tilavuutta. Tilavuusvirta saadaan laskettua yhtälöä 37 mukaillen yhtälön 38 tavoin.

$$Q = wS = w \frac{D^2 \pi}{4}, \quad (38)$$

missä  $D$  on putken halkaisija.

Virtaavan kaasun tilavuusvirta ilmoitetaan normaaliolotilassa, jossa lämpötila on 0 °C ja paine on 1,01325 bar. Todellinen tilavuusvirta saadaan laskettua normaaliolotilan tilavuusvirrasta yhtälön 39 avulla.

$$Q = \frac{Q_N(P_{ABS}(T+T_{ABS})z)}{(P_{IN}+P_{ABS})T_{ABS}} = \frac{Q_N(1,01325(T+273,15)z)}{(P_{IN}+1,01325)273,15}, \quad (39)$$

missä  $Q_N$  on tilavuusvirta normaaliolotilassa,  $P_{ABS}$  on absoluuttinen paine,  $T_{ABS}$  on absoluuttinen lämpötila ja  $z$  on kokoonpuristuvuuskerroin.

### 2.11.3 Suodattimen mitoitus

Suodattimena käytetään vaihdettavilla suodatinosilla olevaa pystysuoraa suodatinta. Suodattimen tarkoituksena on poistaa kiinteät partikkelit sekä nestemäiset aineet kuten öljy- ja vesipisarat maakaasun seasta. Tarvittava suodatinkoko saadaan selvitettyä suodattimen läpi virtaavan kaasun tilavuusvirran avulla. Suodattimen suodatinpinta-ala lasketaan yhtälön 40 avulla seuraavasti, jonka jälkeen saadun suodatinpinta-alan avulla saadaan valittua oikeankokoinen suodatin.

$$A = \frac{Q}{Pw*3600}, \quad (40)$$

missä  $Q$  on suodattimen läpi virtaava tilavuusvirta,  $P$  on paine ja  $w$  on kaasun virtausnopeus suodattimen läpi.

Suodattimesta läpivirtaavaan kaasuun aiheutuva painehäviö ei saa olla suurempi, kuin 100 mbar maksimitilavuusvirralla. Suodattimen aiheuttama painehäviö lasketaan yhtälön 41 tavoin.

$$\Delta P = 10^{(1,93*\log\left(\frac{Q}{PC_f}\right) + \left(\left(\frac{P}{25}\right)^{0,435}\right) - 1,42)/10}, \quad (41)$$

missä  $Q$  on tilavuusvirta,  $P$  on paine ja  $C_f$  on suodattimen koosta riippuva kerroin.

#### 2.11.4 Säätoventtiilin mitoitus

Kaikissa säätoventtiileissä toiminta-arvot, säätoapaineen sekä turvasulun sulkeutumispaineet ovat säädettävissä. Näin samaa venttiilirunkoa voidaan käyttää laajalla teho- ja painealueella. Venttiilin valintaan tarvitaan jonkin verran eri lähtötietoja. Valittaessa venttiiliä on syytä olla tiedossa muun muassa venttiilistä läpivirtaavan kaasun maksimivirtausmäärä, kaasun normaali-, minimi- ja maksimitulopaine sekä sääto- ja turvasulkuventtiilien toimintapaine. Näiden lisäksi on syytä selvittää mahdollisen apuvaroventtiilin tarve ja avautumispaine, suodattimen tarve, käyttölämpötila sekä liitostapa haluttuun putkikokoon. (Riikonen. 1998. s.19.)

Säätoventtiilin laitekoon laskemiseksi tarvitaan venttiilille virtaavan kaasun tilavuusvirta, tulopaine sekä lähtöpaine. Näiden tietojen avulla voidaan laskea virtauskapasiteettikerroin  $KG$ , jonka avulla saadaan venttiilivalmistajien taulukoista valittua oikea laitekoko. Taulukossa 4 on esitetty  $KG$ -kerroimen ja venttiilikoon suhdetta.

**Taulukko 4.** Venttiilikoko ja virtauskapasiteetti (Pietro Fiorentini. 1996. s.5)

Venttiilikoko	25	50	80	100	150	200	250
$KG$ -kerroin	605	2335	5194	8416	17471	27282	38425

Kerroin  $KG$  vastaa maakaasun liikemäärää kriittisissä olosuhteissa säätimen ollessa kokonaan auki. Vastaavasti laitevalmistajien taulukoista voidaan katsoa säätoventtiilin kerroin  $KG$  ja laskea tämän avulla sallittu tilavuusvirta  $Q$ . (Pietro Fiorentini. 1996. s.4-5.)

Kerroimen  $KG$  määrittäminen tapahtuu eri tavalla kaasun olotilasta riippuen. Ei-kriittisissä olosuhteissa eli kun kaasun tulopaine on pienempi kuin kaksi kertaa venttiililtä lähtevä lähtöpaine, voidaan kerroin  $KG$  laskea yhtälön 42 mukaisesti.

$$KG = \frac{Q}{\sqrt{P_{OUT}(P_{IN}-P_{OUT})}} \quad (42)$$

Samasta yhtälöstä voidaan myös laskea tilavuusvirta  $Q$  yhtälön 43 mukaisesti, jos tiedetään kerroin  $KG$ .

$$Q = KG\sqrt{P_{OUT}(P_{IN} - P_{OUT})} \quad (43)$$

Kriittisissä olosuhteissa, eli kun kaasun tulopaine on suurempi kuin kaksinkertainen lähtöpaine, voidaan kerroin  $KG$  laskea yhtälön 44 mukaisesti.

$$KG = \frac{2Q}{P_{IN}} \quad (44)$$

Samasta yhtälöstä saadaan laskettua tilavuusvirta  $Q$  yhtälön 45 mukaisesti, jos tiedetään kerroin  $KG$ .

$$Q = \frac{KG}{2}P_{IN} \quad (45)$$

Edellä mainitut yhtälöt  $KG$ -kertoimen määrittämiseen toimivat kaasun suhteellisen tiheyden ollessa 0,61 ja lämpötilan ollessa 15 °C. Suhteellisen tiheyden ja lämpötilan ollessa jotain muuta, on tilavuusvirran kertoimena käytettävä  $F_c$ -arvoa.  $F_c$  saadaan laskettua yhtälön 46 tavoin.

$$F_c = \sqrt{\frac{175,8}{\rho(275,16+T)}} \quad (46)$$

missä  $\rho$  on kaasun suhteellinen tiheys ja  $T$  on lämpötila.

Hyvän suorituskyvyn saavuttamiseksi sekä eroosion ja suuren äänenvoimakkuuden välttämiseksi on kaasun virtausnopeus säätöventtiilissä pidettävä pienempänä kuin 150 m/s. (Pietro Fiorentini. 1996. s.6). Kaasun virtausnopeus venttiilissä voidaan laskea yhtälön 47 mukaisesti.

$$V = 345,92 \frac{Q}{DN^2} \frac{1-0,002P_{OUT}}{1+P_{OUT}}, \quad (47)$$

missä  $DN$  on säätimen koko millimetreissä.

Säätöventtiileiden sekä muiden putkistoon kuuluvien rakenneosien kertavastusten aiheuttamien painehäviöiden laskeminen teoreettisesti on hankalaa. Usein joudutaan turvautumaan empiirisiin kokeisiin, joissa selvitetään osien aiheuttama virtausvastus. (Bohl. 1988. s.105.)

Säätöventtiilin painehäviö voidaan laskea yhtälön 48 mukaisesti. Yhtälössä olevan kertavastuskerroin  $\zeta$  riippuu osan, tässä tapauksessa säätöventtiilin rakenteesta sekä virtauksen Reynoldsin luvusta.

$$\Delta p_v = \zeta \frac{\rho}{2} \bar{w}^2 \quad (48)$$

Turvasulkuventtiilin aiheuttama painehäviö voidaan laskea yhtälön 49 mukaisesti.

$$\Delta P = \frac{K_G P_{IN} - \sqrt{K_G^2 P_{IN}^2 - 4Q^2}}{2K_G}, \quad (49)$$

missä  $P_{IN}$  on absoluuttinen sisääntulopaine,  $Q$  on tilavuusvirta ja  $K_G$  on virtausvakio. (Pietro Fiorentini.. 2008. s.5.)

### 2.11.5 Lämmönvaihtimen mitoitus

Kaasun lämpötila laskee paineen alentuessa Joule-Thomson ilmiön mukaisesti. Lämpötilan aleneminen riippuu kaasun paineesta, koostumuksesta sekä lähtölämpötilasta. Lämpötilan aleneminen on 0,4 °C/bar. Lämmönvaihtimelta vaadittu lämmitysteho saadaan laskettua yhtälön 50 mukaisesti. (von Günter et al. 1982. s.157.)

$$\Phi = Q C_p \left[ (P_{IN} - P_{OUT}) \frac{dt}{dp} + (T_{OUT} - T_{IN}) \right], \quad (50)$$

missä  $Q$  on kaasun maksimitilavuusvirta,  $C_p$  on kaasun ominaislämpöarvo,  $T_{IN}$  on tulolämpötila ja  $T_{OUT}$  on lähtölämpötila.

Kaasun paineen alenemisesta johtuva lämpötilan muutos saadaan laskettua yhtälön 51 avulla.

$$\Delta T = 0,4(P_{IN} - P_{OUT}), \quad (51)$$

missä  $P_{IN}$  on putkistosta paineenvähennysasemalle tuleva tulopaine ja  $P_{OUT}$  on paineenvähennysasemalta lähtevä alennettu lähtöpaine.

#### 2.11.6 Määrämittarin mitoitus

Kaasumäärän mittaaminen perustuu virtaavan maakaasun tilavuusvirran mittaamiseen. Oikean kokoinen kaasumäärämittari saadaan valittua laskemalla paineenvähennysaseman läpi virtaavan kaasun todellinen tilavuusvirta. Todellinen tilavuusvirta saadaan laskettua alla esitetyn yhtälön 52 avulla.

$$Q = \frac{Q_N(P_{ABS}(T+T_{ABS})z)}{(P_{IN}+P_{ABS})T_{ABS}} = \frac{Q_N(1,01325(T+273,15)z)}{(P_{IN}+1,01325)273,15}, \quad (52)$$

missä  $Q_N$  on tilavuusvirta normaaliolotilassa,  $P_{ABS}$  on absoluuttinen paine,  $T_{ABS}$  on absoluuttinen lämpötila ja  $z$  on kokoonpuristuvuuskerroin.

Todellisen tilavuusvirran selvityksen jälkeen voidaan valita oikean kokoinen määrämittari mittarivalmistajien taulukoiden avulla, joista käy ilmi eri mittarikokojen virtauskapasiteetit.

Määrämittari, kuten muutkin putkiston osat, aiheuttavat painehäviötä. Määrämittarin aiheuttama painehäviö on verrannollinen kaasun tiheyteen sekä tilavuusvirran neliöön. Määrämittarivalmistajat ilmoittavat mittarin aiheuttaman painehäviön tietyllä kaasun tiheydellä ja mittarin maksimivirtaamalla. Painehäviö eri tiheydellä ja halutulla virtaamalla voidaan laskea alla esitetyn yhtälön 53 avulla.

$$\Delta P = \Delta P_{spec} \frac{\rho}{0,6 P_{ATM}} \left( \frac{Q_m}{Q_{max}} \right)^2, \quad (53)$$



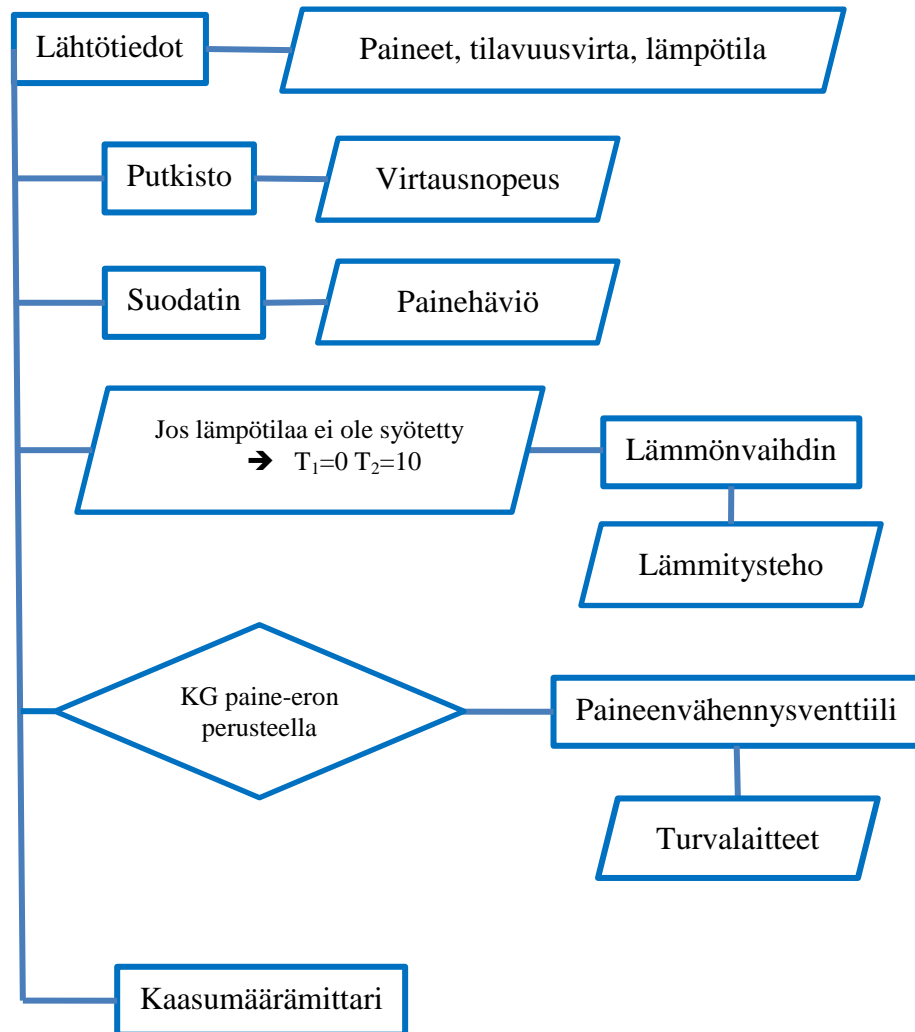
missä  $\Delta P_{spec}$  on valmistajan ilmoittama maksimipainehäviö määrämittarille,  $Q_m$  on todellinen virtausnopeus ja  $Q_{max}$  on määrämittarin maksimivirtausmäärä.

### 3 MITOITUSOHJELMISTON KEHITTÄMINEN

Mitoitusohjelmisto toteutettiin Microsoft Excel -ohjelman ja Visual Basic -ohjelmointikielen avulla. Excel valittiin toiminta-alustaksi sen yleisyyden ja helppokäyttöisyyden takia. Excel löytyy monista tietokoneista, eikä mitoitusohjelmiston käyttö näin vaadi erillisten lisäohjelmien asennusta. Mitoitusohjelmisto pyrittiin pitämään mahdollisimman selkeänä ja yksiselitteisenä, jotta sen käyttö ei vaatisi erillistä koulutusta tai hankalaa opettelua. Ohjelmistoon syötetään tiedetyt alkuarvot ja lähtötilanne, jonka perusteella ohjelmisto laskee ja esittää paineenvähennysaseman eri osien valintaan tarvittavat tiedot.

Ohjelmisto esittää tarvittavat turvalaitteet ilmoitetuilla painearvoilla ohjelman tekohetkellä voimassaolevien standardien mukaisesti. Käyttäjän on kuitenkin syytä tarkistaa maakaasun paineenvähennysaseman turvalaitteita koskevan standardin voimassaolo, jotta tarvittavat turvalaitemääräykset täyttyvät.

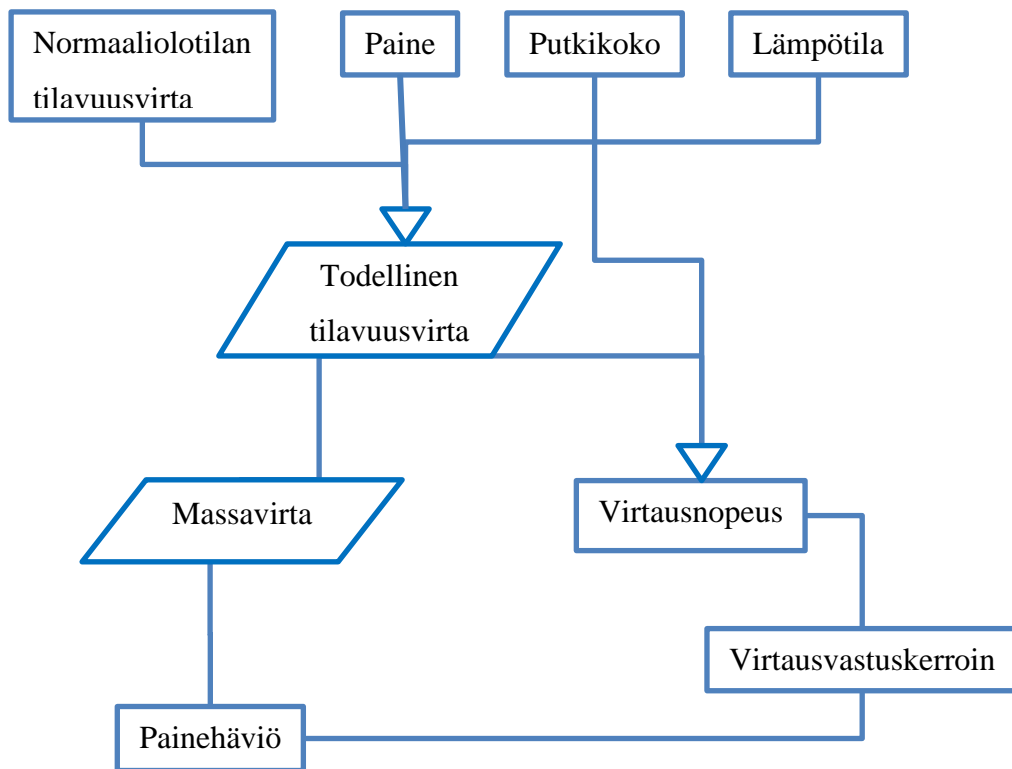
Ohjelma toteutettiin Visual Basic – ohjelmointikielen avulla. Ohjelman taustaksi laitettiin PI-kaavio maakaasun paineenvähennyslaitteesta, jotta ohjelmasta saadaan havainnollisempi. Käyttäjä syöttää ohjelmaan taustan PI-kaavion mukaiseen oikeaan kohtaan tiedetyt lähtötiedot, jonka jälkeen ohjelma esittää paineenvähennyslaitteen eri osien mitoitus tiedot PI-kaavion mukaisessa järjestyksessä. Ohjelman avulla voidaan laskea kaikkien laitteiden tiedot yhdellä kertaa, tai vaihtoehtoisesti tietyn osan mitoitus tiedot. Laskettujen tuloksien lisäksi ohjelma huomauttaa käyttäjää mahdollisista rajoituksista esimerkiksi virtausnopeuden suhteen. Lasketut tulokset tallennetaan automaattisesti Excel-tiedostoon, jotta niitä on helppo tarkastella jälkikäteen. Ohjelmiston toiminta on pääpiirteittäin esitetty vuokaaviossa kuvassa 6.



**Kuva 6.** Mitoitusohjelmiston vuokaavio.

### 3.1 Putkisto

Ohjelmiston avulla saadaan laskettua putkistossa syntyvä painehäviö ja putkistossa virtaavan kaasun virtausnopeus sekä tilavuus- ja massavirta. Lähtötietojen tarve eri arvojen selvittämiseen vaihtelee. Kuvassa 7 on esitetty yksinkertaistettu malli putkiston mitoituksesta ohjelmassa.



**Kuva 7.** Putkiston mitoitus yksinkertaistetusti

Tilavuusvirran suuruuden selvittämiseksi normaaliolotilassa olevasta tilavuusvirrasta käyttäjän on annettava lähtötietoina putkiston paine, putkistossa virtaavan kaasun tilavuusvirta normaaliolotilassa sekä lämpötila. Tulolämpötilaksi ohjelma olettaa 0 °C, ellei käyttäjä syötä lämpötilaksi toista arvoa. Näiden lähtötietojen avulla saadaan alla esitetyn yhtälön 39 avulla laskettua putkistossa olevan kaasun tilavuusvirta vallitsevissa oloissa.

$$Q = \frac{Q_N(P_{ABS}(T+T_{ABS})z)}{(P_{IN}+P_{ABS})T_{ABS}} = \frac{Q_N(1,01325(T+273,15)z)}{(P_{IN}+1,01325)273,15}$$

Todellisen tilavuusvirran selvityksen jälkeen saadaan laskettua virtaavan kaasun virtausnopeus alla esitetyn yhtälön 37 avulla, jossa tilavuusvirran lisäksi tarvittava lähtötieto on putkiston poikkipinnan pinta-ala, joka saadaan laskettua putken halkaisijan avulla.

$$w = \frac{Q}{S}$$

Painehäviö saadaan laskettua laskemalla ensin alla esitetyn yhtälön 33 avulla putkistosta ulostulevan kaasun paine, jonka jälkeen vähennetään saatu tulos tiedetystä lähtöpaineesta. Putkistosta ulostulevan paineen laskemiseen tarvitaan lukuisia tietoja, jotka ohjelmisto laskee automaattisesti käyttäjän syötettyä tarvittavat lähtötiedot ohjelmistoon. Tarvittavia lähtötietoja, jotka ohjelmistoon täytyy syöttää, ovat kaasun tulopaine, kaasun lämpötila, putkiston pituus ja koko sekä mahdolliset korkeuden muutokset putkistossa. Lähtötietojen avulla ohjelmisto laskee myös kokoonpuristuvuuskertoimen, virtausvastuskertoimen, massavirran sekä putken poikkipinta-alan.

$$P_{OUT} = \sqrt{\frac{P_{IN}^2 - \frac{\lambda zRT|M|ML}{DS^2}(1+\frac{\alpha}{2})}{1+\alpha(1+\frac{\alpha}{2})}}$$

Virtausvastuskertoimen yhtälö riippuu virtauksen muodosta, joten oikean yhtälön valintaan tarvitsee tietää onko virtaus laminaarinen vai turbulenttinen. Tästä syystä on selvitettävä Reynoldsin luku. Ohjelmisto laskee Reynoldsin luvun alla esitetyn yhtälön 11 mukaisesti, jonka perusteella saadaan valittua oikea yhtälö virtausvastuskertoimen määrittämiseen. Reynoldsin luvun määrittämiseksi tarvitsee tietää putkikoko, virtausnopeus, kaasun tiheys ja dynaaminen viskositeetti.

$$Re = \frac{Dw}{\nu} = \frac{Dw\rho}{\eta}$$

Reynoldsin luvut ollessa selvillä, saadaan laskettua arvo virtausvastuskertoimelle. Maakaasuvirtaus on usein turbulenttista, jolloin virtausvastuskertoimen yhtälönä käytetään alla esitettyä yhtälöä 13. Mitoitusohjelma valitsee automaattisesti oikean yhtälön Reynoldsin luvun perusteella.

$$\lambda^{-1/2} = -2\log\left(\frac{4,518}{Re}\log\frac{Re}{7} + \frac{k}{3710D}\right)$$

Kaasun tiheys muuttuu paineen muuttuessa, joten tiheytenä ei voida käyttää normaaliolotilassa olevan kaasun tiheyttä. Käyttäjän syötettyä ohjelmistoon kaasun paineen ja lämpötilan, laskee ohjelmisto kaasun tiheyden vallitsevissa olosuhteissa alla esitetyn yhtälön 8 tavoin.

$$\rho = \frac{MP}{zRT}$$

### 3.2 Suodatin

Maakaasun paineenvähennysasemalla suodattimen valintaan vaikuttaa kaksi kriteeriä. Suodattimella täytyy olla tietty ennalta määrätty suodattavuus eri partikkeleille, sekä suodattimen aiheuttama painehäviö ei saa olla yli 100 mbar. Suodatinkoko saadaan laskettua tilavuusvirran, kaasun paineen ja virtausnopeuden avulla alla esitetyn yhtälön 40 avulla.

$$A = \frac{Q}{PV \cdot 3600},$$

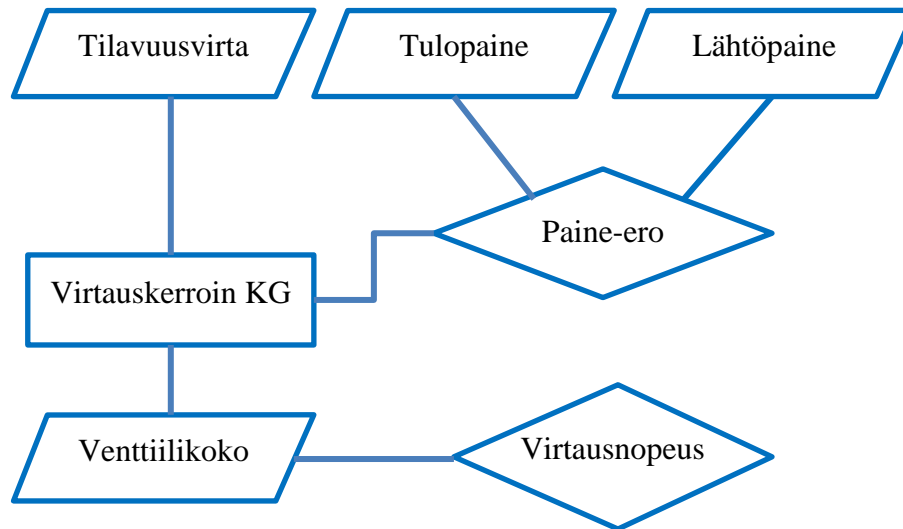
Tarvittavan suodatinpinta-alan ollessa selvillä, saadaan valittua suodatinkoko, jonka jälkeen tarkistetaan valitun suodatinkoon aiheuttama painehäviö. Suodattimen aiheuttama painehäviö saadaan laskettua alla esitetyn yhtälön 41 mukaisesti. Painehäviön syntyyn vaikuttavat kaasun paine, tilavuusvirta sekä suodattimen vastuskerroin, joka vaihtelee suodattimen koon mukaan. Ohjelma laskee käyttäjän ilmoittaman tulopaineen ja tilavuusvirran avulla suodattimen painehäviön, ja ilmoittaa käyttäjälle minkä kokoisella suodattimella painehäviö on alle sallitun 100 mbar:n.

$$\Delta P = 10^{(1,93 \cdot \log\left(\frac{Q}{PC_f}\right) + \left(\left(\frac{P}{25}\right)^{0,435}\right) - 1,42) / 10}$$

### 3.3 Paineenvähennysventtiili

Paineenvähennysventtiilin valintaan tarvitaan osittain samoja lähtötietoja kuin edellä mainitussa putkiston tilavuusvirran, virtausnopeuden ja painehäviön laskemisessa on käytetty. Oikean kokoisen paineenvähennysventtiilin valintaan tarvitsee ohjelmiston

käyttäjän syöttää putkistolta paineenvähennysasemalle tuleva tulopaine, kaasun tilavuusvirta sekä paineenvähennysasemalta haluttu lähtevä lähtöpaine. Kuvassa 8 on esitetty mitoitusohjelman toiminta paineenvähennysventtiilin mitoituksessa.



**Kuva 8.** Paineenvähennysventtiilin mitoitus

Oikea venttiilikoko saadaan valittua tarkistamalla venttiilin virtauskerroin halutulla tilavuusvirralla ja tulopaineella. Yhtälö virtauskerroimen selvittämiseksi riippuu tulo- ja lähtöpaineiden eron suuruudesta. Niin sanotuissa ei-kriittisissä olosuhteissa tulopaineen ollessa pienempi kuin kaksi kertaa lähtöpaine, käytetään alla esitettyä yhtälöä 40.

$$KG = \frac{QF_c}{\sqrt{P_{OUT}(P_{IN}-P_{OUT})}}$$

Kriittisissä olosuhteissa tulopaineen ollessa suurempi kuin kaksi kertaa lähtöpaine, käytetään alla esitettyä yhtälöä 44.

$$KG = \frac{2QF_c}{P_{IN}}$$

Näiden edellä mainittujen venttiilivakioiden lisäksi tarkistetaan kaasun virtausnopeus paineenvähennysventtiilissä. Paineenvähennysventtiilissä kaasun virtausnopeus

suositellaan pidettävän alle 150 m/s. Ohjelmisto laskee virtausnopeuden alla esitetyn yhtälön 47 mukaisesti ja ilmoittaa, jos se on liian korkea.

$$V = 345,92 \frac{Q}{DN^2} \frac{1-0,002P_{OUT}}{1+P_{OUT}}$$

### 3.4 Turvalaitteet

Turvalaitteiden määrä ja tarve riippuu putkiston ja paineenvähennysaseman painetasosta. Standardeissa on määritelty turvalaitteiden vähimmäismäärät tietyllä painetasolla. Turvalaitteiden avulla voidaan painehäiriöiden aikana estää liian korkean paineen pääsy paineenvähennysasemalta jakeluputkistoon ja kuluttajan laitteisiin.

Mitoitusohjelmisto ilmoittaa käyttäjälle halutulla painetasolla vaadittavat turvalaitteet, sekä laskee niiden aiheuttaman painehäviön. Painehäviö lasketaan alla esitetyn yhtälön 49 avulla.

$$\Delta P = \frac{K_G P_{IN} - \sqrt{K_G^2 P_{IN}^2 - 4Q^2}}{2K_G}$$

### 3.5 Lämmönvaihdin

Kaasun lämpötila muuttuu 0,4 °C/bar paineen muuttuessa, joten paineenvähennysasemalla tapahtuvan paineen alenemisen yhteydessä sitä on syytä lämmittää hydraatin muodostumisen sekä vesihöyryn muodostumisen välttämiseksi. Lämmönvaihtimen mitoitukseen tarvittavia lähtötietoja ovat kaasun tiheys, tilavuusvirta ja ominaislämpöarvo, sekä paineen muutos ja siitä aiheutuva lämpötilan muutos. Näiden lisäksi tarvitaan kaasun tulo- ja haluttu lähtölämpötila. Ohjelma olettaa tulolämpötilan olevan 0 °C ja halutun lähtölämpötilan olevan 10 °C, ellei käyttäjä syötä muita lämpötila-arvoja ohjelmaan.

Lämpötilan lasku lasketaan käyttäjän syötettyä kaasun tulo- ja lähtöpaineen yhtälön 48 mukaisesti. Lämmönvaihtimelta vaadittava lämmitysteho saadaan laskettua alla esitetyn yhtälön 50 avulla.



$$\Phi = Q C_p \left[ (P_{IN} - P_{OUT}) \frac{dt}{dp} + (T_{OUT} - T_{IN}) \right]$$

### 3.6 Määrämittarit

Maakaasun määrämittareiden valinta perustuu paineenvähennysaseman läpivirtaavan kaasun määrään. Mitoitusohjelma laskee todellisen maakaasun tilavuusvirran käyttäjän ilmoittamien kaasumäärien perusteella alla esitetyn yhtälön 52 mukaisesti ja esittää pienimmän mahdollisen turbiinimittarikoon, jonka virtauskapasiteetti on riittävä halutulla virtausmäärällä.

$$Q = \frac{Q_N (P_{ABS} (T + T_{ABS})^z)}{(P_{IN} + P_{ABS}) T_{ABS}} = \frac{Q_N (1,01325 (T + 273,15)^z)}{(P_{IN} + 1,01325) 273,15}$$

### 3.7 CASE: Maakaasun paineenvähennysaseman paineenvähennyslaitteen mitoitus

Mitoitusohjelmiston käyttöön liittyvänä esimerkkinä esitellään ohjelmiston avulla tehdyt laskelmat erään paineenvähennysaseman paineenvähennyslaitteen mitoituksesta. Esimerkissä selviää, mitä kaikkea on otettava huomioon, kun asemaa suunnitellaan.

Lähtötietoina aseman mitoitukseen on tiedossa asemalta haluttu lähtöpaine, joka on 8 bar sekä tilavuusvirta, joka on kaasun ollessa normaaliolotilassa 2000 m<sup>3</sup>/h. Asemalle tuleva kaasun tulopaine on 30...54 bar ja tilavuusvirta 2000 m<sup>3</sup>/h. Tässä esimerkissä selvitetään millainen paineenvähennyslaite asemalle tarvitaan.

Asema koostuu kahdesta rinnakkaisesta täydellisestä paineenvähennyslaitteistosta. Molemmassa linjoissa on siis oma suodatin, lämmönvaihdin, paineensäätöventtiili, kaasumäärämittari sekä tarvittavat turvalaitteet. Turvalaitteiden määrä riippuu paine-erosta. Säätimelle tulevan tulopaineen ollessa suurempi, kuin säätimeltä lähtevän lähtöpaineen, tarvitaan yksi turvalaite. Jos paineiden erotus on yli 16 bar:ia, tarvitaan lisäksi toinen turvalaite. Tässä tapauksessa tarvitaan siis kaksi turvalaitetta.

### 3.7.1 Putkiston mitoitus

Paineenvähennysaseman tehtäväksi halutaan 20 MW, joka vastaa 2000 m<sup>3</sup>/h virtaamaa kaasun ollessa normaalitilassa, eli paineen ollessa 1,01325 bar ja lämpötilan 0 °C. Normaaliolosuhteiden tilavuusvirta saadaan muunnettua vastaamaan todellista tilavuusvirtaa yhtälön 39 avulla seuraavasti.

$$Q = \frac{Q_N(P_{ABS}(T+T_{ABS})^Z)}{(P_{IN}+P_{ABS})T_{ABS}} = \frac{2000 \frac{m^3}{h} (1,01325 \text{ bar} (0+273,15 \text{ K})^{0,939})}{(30 \text{ bar} + 1,01325 \text{ bar}) 273,15 \text{ K}} = 61,33 \text{ m}^3/h$$

Paineenvähennysasemaa suunniteltaessa on tarkistettava, että kaasun virtausnopeus ei ylitä sallittua rajaa putkistossa. Sallitun virtausnopeuden ylittyessä on valittava suurempi putkikoko. Virtausnopeuden kaasuputkistossa täytyy olla alle 20 m/s. Paineenvähennysasemalle tulevan DN100-kokoisen siirtoputken koko on tälle virtausmäärälle riittävä, sillä 30 bar:n tulopaineella virtausnopeudeksi saadaan yhtälön 37 avulla laskettua 2,17 m/s seuraavasti.

$$w = \frac{Q}{S} = \frac{61,33 \frac{m^3}{h} / 3600 \text{ s}}{(0,1 \text{ m})^2 \pi / 4} = 2,17 \text{ m/s}$$

Tässä tapauksessa tulopuolen putkikooksi olisi virtausnopeuskriteerin perusteella mahdollista valita pienempikin putkikoko, mutta yleisesti tulopuolella on käytetty vähintään DN100-kokoista putkea sen mekaanisen kestävyysnäkökohdista. Pienempi putki voisi vaurioitua esimerkiksi kuorma-auton ylittäessä putkilinjan, eikä pienemmästä putkesta saada juurikaan säästöjä. Maanrakennustyöt kustantavat yhtä paljon, laitettiin maahan DN50- tai DN100-kokoinen putki.

Paineenvähennysaseman matalapainepuolella kaasun paine on 8 bar ja tilavuusvirta normaalitilassa 2000 m<sup>3</sup>/h. Todellinen tilavuusvirta matalapainepuolella saadaan laskettua samalla tavalla kuin korkeapainepuolellakin alla esitetyn yhtälön 39 mukaisesti.

$$Q = \frac{Q_N(P_{ABS}(T+T_{ABS})^Z)}{(P_{IN}+P_{ABS})T_{ABS}} = \frac{2000 \frac{m^3}{h} (1,01325 \text{ bar} (10+273,15 \text{ K})^{0,985})}{(8 \text{ bar} + 1,01325 \text{ bar}) 273,15 \text{ K}} = 229,52 \text{ m}^3/h$$

Tällä tilavuusvirralla virtausnopeudeksi DN80-kokoisella putkella saadaan 12,69 m/s alla esitetyn yhtälön 37 mukaisesti.

$$w = \frac{Q}{S} = \frac{229,52 \frac{m^3}{h} / 3600 s}{(0,08 m)^2 \pi / 4} = 12,69 m/s$$

Pienemmällä DN50-kokoisella putkella virtausnopeus on 32,47 m/s, joka on liian suuri nopeus virtausnopeuskriteerin perusteella.

### 3.7.2 Suodattimen mitoitus

Suodatin sijaitsee paineenvähennysasemalla ennen paineenvähennysventtiiliä, joten se on korkeapainepuolella. Tarvittava suodatinpinta-ala saadaan laskettua kaasun tilavuusvirran, virtausnopeuden ja paineen avulla alla esitetyn yhtälön 40 mukaisesti.

$$A = \frac{Q}{Pw*3600} = \frac{2000 \frac{m^3}{h}}{30 bar * 2,17 \frac{m}{s} * 3600 s} = 0,0085 m^2$$

Suodatinpinta-alan perusteella saadaan valittua suodatinkooksi G1-tyyppinen patruunasuodatin.

Suodattimen painehäviö saadaan laskettua alla esitetyn yhtälön 41 avulla.

$$\Delta P = 10^{(1,93 * \log\left(\frac{Q}{PC_f}\right) + \left(\left(\frac{P}{25}\right)^{0,435} - 1,42\right) / 10} = 10^{(1,93 * \log\left(\frac{2000 \frac{m^3}{h}}{30 bar * 1}\right) + \left(\left(\frac{30}{25}\right)^{0,435} - 1,42\right) / 10}$$

$$= 152 mbar$$

Painehäviö G1-tyyppisellä patruunasuodattimella ylittää sallitun 100 mbar rajan. Astetta isommalla G1,5-tyyppisellä suodattimella, jonka  $C_f$  on 2, painehäviö jää sallitun rajan alle ollen noin 40 mbar. Suodattimeksi valitaan siis G1,5 patruunasuodatin.

### 3.7.3 Paineenvähennysventtiilin mitoitus

Aseman korkeapainepuolen tuloputken putkikooksi valittiin siis DN100, joka edellä todettiin riittäväksi. Putken päätytükkin kooksi valitaan yhtä suuri koko putken kanssa, eli DN100. Päätytükistä lähtevät linjat, suotimet ja lämmönvaihtimet ovat kokoa DN80, jolloin virtausnopeus 30 barin tulopaineella on 12,69 m/s, joka on vielä hyväksyttävä.

Paineensäätölinjan säätöventtiilin kooksi virtauskertoimen  $KG$  perusteella riittää DN25-kokoinen paineenalennusventtiili. Paine-ero ennen ja jälkeen paineenalennusventtiilin on 22 bar, joka on enemmän kuin kaksi kertaa suurempi kuin paineenalennusasemalta lähtevä lähtöpaine. Tästä syystä  $KG$ -arvon määrittämiseen käytetään niin sanotulle kriittisille olosuhteille soveltuvaa yhtälöä 44. Paineenvähennysventtiilin virtauskertoimen määrittämiseen käytettävä yhtälö soveltuu suoraan, kun kaasun suhteellinen tiheys on 0,61 ja lämpötila 15 °C. Suomeen tuotavan maakaasun suhteellinen tiheys on 0,56 ja paineenalennusasemalla kaasun lämpötila nostetaan normaalisti vain 10 °C:een. Tästä syystä virtauskerrointa määritettäessä on kaasun tilavuusvirta kerrottava  $F_c$ -kertoimella.  $F_c$ -kerroin saadaan laskettua yhtälön 46 avulla. Yhtälöt kertoimien laskemiseen on esitetty alapuolella.

$$F_c = \sqrt{\frac{175,8}{\rho(273,15+T)}} = \sqrt{\frac{175,8}{0,56(273,15+10^\circ\text{C})}} = 1,05$$

$$KG = \frac{2QF_c}{P_{IN}} = \frac{2 \cdot 2000 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot 1,05}{30 \text{ bar}} = 140,39$$

Virtauskertoimen  $KG$  perusteella voidaan venttiilivalmistajan taulukoista valita venttiilikoko, joka riittää tällä virtauksella. Taulukosta saadaan valittua venttiilikoko DN25. Venttiilikoon valinnan jälkeen on syytä tarkastaa kaasun virtausnopeus valitulla venttiilikolla vallitsevissa olosuhteissa. Säätöventtiilissä virtaavan kaasun nopeus saadaan laskettua yhtälön 47 avulla. Alla on laskettu maksimivirtausmäärällä DN25-kokoisen venttiilin läpi virtaavan kaasun nopeus.

$$V = 345,92 \frac{Q}{DN^2} \frac{1-0,002P_{OUT}}{1+P_{OUT}} = 345,92 \frac{2000 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}{25^2} \frac{1-0,002 \cdot 8 \text{ bar}}{1+8 \text{ bar}} = 121,03 \text{ m/s}$$

Säätöventtiilivalmistajan ohjeiden mukaisesti maksimivirtausnopeus venttiilissä on 150 m/s, joten valitun venttiilin kapasiteetti riittää niin virtauskapasiteetin kuin virtausnopeudenkin puolesta.

#### 3.7.4 Turvalaitteet

Yhden turvalaitteen lisäksi tarvitaan toinen turvalaite, kun maksimikäyttöpaineiden erotus ennen säädintä ja sen jälkeen on yli 16 bar. Tässä tapauksessa tarvitaan siis yhteensä kaksi turvalaitetta, sillä maksimikäyttöpaineiden erotus on yli 16 bar. Turvalaitteiksi valitaan samankokoiset turvasulkuventtiilit paineenvähennysventtiilin kanssa, eli kokoa DN25, jonka virtausvakio on 549.

Turvasulkuventtiilien ollessa auki asennossa, kaasu virtaa niiden läpi normaalisti. Venttiileistä kuitenkin aiheutuu pientä painehäviötä, joka voidaan laskea alle esitetyn yhtälön 49 mukaisesti.

$$\Delta P = \frac{K_G P_{IN} - \sqrt{K_G^2 P_{IN}^2 - 4Q^2}}{2K_G}$$

Yllä oleva yhtälö pätee, kun maakaasun suhteellinen tiheys on 0,61 ja lämpötila 15 °C. Suomessa maakaasun suhteellinen tiheys on 0,56 ja tässä tapauksessa kaasun lämpötila on 0 °C. Yhtälössä olevaa  $K_G$ -arvoa täytyy hieman muuttaa tämän takia.

Korvaava  $K_G$ -arvo saadaan laskettua seuraavasti.

$$K_{G1} = K_G * \sqrt{\frac{175,8}{S*(273,16+T)}} = 549 * \sqrt{\frac{175,8}{0,56*(273,16+0)}} = 589,$$

jolloin painehäviö voidaan laskea seuraavasti.

$$\Delta P = \frac{K_{G1} P_{IN} - \sqrt{K_{G1}^2 P_{IN}^2 - 4Q^2}}{2K_{G1}} = \frac{589*30 \text{ bar} - \sqrt{589^2*30^2 - 4*2000^2}}{2*589} = 0,39 \text{ bar}$$

### 3.7.5 Lämmitys

Paineenvähennysasemalla on kaksi samanlaista maakaasukattilaa kaasun ja asemarakennuksen lämmitystä varten. Toinen kattila toimii kuitenkin vain varakattilana ja mahdollisen kattilan rikkoontumisen aikana korvaa rikkoontunutta lämmityskattilaa. Maakaasun lämpötila laskee paineen alentuessa, joten sitä täytyy lämmitellä. Olettamuksena tämän selvityksen teossa käytetään lämmönvaihdinta mitoittaessa kaasun tulopaineena lähtötietoina saatua suurinta painetta, joka asemalle voi tulla, joka on 54 baria ja tulolämpötilana 0 °C. Kaasun paine halutaan siis alentaa 54 barista 8 bariin. Kaasun paineenalennemisen aiheuttama lämpötilanmuutos saadaan laskettua yhtälön 51 avulla seuraavasti.

$$\Delta T = 0,4(P_{IN} - P_{OUT}) = 0,4(54 \text{ bar} - 8 \text{ bar}) = 18,4 \text{ °C}$$

Paineenalennemisen aiheuttaman kaasun lämpötilan muutoksen ollessa selvillä, voidaan yhtälön 51 avulla laskea lämpökattilalta vaadittava lämmitystehon tarve kaasulle, kun paineenvähennysasemalta lähtevän kaasun lämpötilaksi halutaan 10 °C.

$$\begin{aligned} \Phi &= Q C_p \left[ (P_{IN} - P_{OUT}) \frac{dt}{dp} + (T_{OUT} - T_{IN}) \right] \\ &= \frac{2000 \text{ m}^3/h}{3600 \text{ s}} * 1,84 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{K}} [(54 \text{ bar} - 8 \text{ bar}) 0,4 + (10 \text{ K} - 0 \text{ K})] = 29 \text{ kW} \end{aligned}$$

Kaasun lämmittämiseen vaadittava lämmitysteho on siis 29 kW. Kaasun lämmittämisen lisäksi samalla lämpökattilalla hoidetaan paineenvähennysaseman rakennuksen lämmitys. Rakennuksen lämmitystehoksi oletetaan riittävän 60 W/m<sup>3</sup>, jolloin 120 m<sup>3</sup> paineenvähennysaseman lämmitystehoksi tarvitaan 7,2 kW. Yhteensä lämmitystehoa tarvitaan siis 36,2 kW.

### 3.7.6 Kaasumäärämittari

Kaasumäärämittaria valittaessa on tarkistettava määrämittarin virtauskapasiteetti vallitsevissa olosuhteissa. Määrämittareiden valmistajien taulukoimista arvoista nähdään erikokoisten määrämittarien virtauskapasiteetteja.

Case-tapauksessa maakaasun paine on 8 baria ja tilavuusvirta on normaaliolotilassa olevalle kaasulle 2000 m<sup>3</sup>/h. Todellinen, määrämittarista läpivirtaava, tilavuusvirta 8 barin paineessa on noin 230 m<sup>3</sup>/h alla esitetyn yhtälön 52 mukaisesti.

$$Q = \frac{Q_N(P_{ABS}(T+T_{ABS})^Z)}{(P_{IN}+P_{ABS})T_{ABS}} = \frac{2000 \frac{m^3}{h} (1,01325 \text{ bar} (10+273,15 \text{ K})^{0,985})}{(8 \text{ bar} + 1,01325 \text{ bar}) 273,15 \text{ K}} = 229,52 \text{ m}^3/\text{h}$$

Todellisen virtaaman perusteella paineenvähennysaseman kaasumäärämittariksi saadaan määrämittarivalmistajan taulukoiden avulla valittua DN80-kokoinen G250-turbiinimittari, jonka maksimivirtauskapasiteetti on 20–400 m<sup>3</sup>/h. Mittalinjan kooksi valitaan myös DN80, jossa virtausnopeus 2000 m<sup>3</sup>/h normaalitilavuusvirralla on 12,68 m/s. Pienemmällä putkikoolla virtausnopeus ylittäisi putkistossa sallitun maksimivirtausnopeuden, joka on 20 m/s.

#### 4 TULOSTEN TARKASTELU

Diplomityön keskeisenä ongelmana oli selvittää maakaasun paineenvähennysaseman paineenvähennyslaitteen mitoitus, sekä tehdä selvitettyjen tietojen avulla mitoitusohjelmisto paineenvähennyslaitteen mitoitukseen. Paineenvähennyslaitteen mitoituskriteerien selvittäminen alkoi tarkastelemalla kaasun käyttäytymistä putkivirtauksessa kirjallisuuden avulla.

Maakaasun paineenvähennysasemiin liittyviä tutkimuksia ja julkaisuja löytyy varsin niukasti. Monet maakaasuun liittyvät tutkimukset keskittyvät pääasiassa kaasuputkistoihin, eivätkä niinkään putkiston eri elementteihin. Putkivirtaukseen liittyviä tutkielmia ja julkaisuja löytyy runsaasti, niistäkin monet ovat keskittyneet muiden aineiden kuin kaasujen virtaukseen.

Tutkimuksen aikana on käynyt ilmi, ettei reaalikaasun kokoonpuristuvan virtauksen analysointi ei ole aivan niin yksinkertaista, kuin esimerkiksi kokoonpuristumattomien virtausten analysointi. Kokoonpuristuvassa virtauksessa monet asiat vaikuttavat toisiinsa, jonkin suureen muuttuessa toinenkin muuttuu. Kaasun kokoonpuristuvassa virtauksessa kaasun tiheys muuttuu paineen muuttuessa. Kaasun paine vaihtelee myös kaasun lämpötilan muuttuessa. Näin ollen esimerkiksi painehäviön laskenta on verrattain hankalaa kaasun putkivirtaukselle. Lisäksi kaasun koostumuksella on vaikutusta kaasun käyttäytymiseen. Maakaasun koostumus vaihtelee suuresti tuotantoalueesta riippuen, joltain tuotantoalueelta saatu kaasu sisältää esimerkiksi enemmän metaania kuin toiselta. Kaasuseoksen koostumus vaikuttaa kaasun moolimassaan, joka puolestaan vaikuttaa kaasun tiheyteen. Tässä tutkielmassa käytettiin Venäjältä Suomeen tulevalle kaasulle ilmoitettuja arvoja, eikä näin mitoitusohjelman tulokset suoraan käy muille kaasukoostumuksille.

Osa kaasun yhtälöistä on empiirisin tutkimuksin selvitettyjä. Tällaisia empiirisin tutkimuksin selvitettyjä yhtälöitä ovat muun muassa edellä mainittu kaasun kokoonpuristuvuuskertoimen yhtälö sekä kaasun virtausvastuskertoimen määrittäminen turbulentsissa virtauksessa. Maakaasun putkivirtaukselle esitetty painehäviön yhtälö soveltuu korkeapaineisen putkivirtauksen tarkasteluun. Se ei kuitenkaan ole aivan



absoluuttisen tarkka, johtuen muun muassa edellä mainituista kokoonpuristuvuus- ja virtausvastuskertoimien tarkkuudesta sekä laskennan mahdollistamiseksi tehdyistä yksinkertaistuksista, joissa oletettiin kaasuvirran olevan vakaa.

Työssä saatiin koottua varsin kattava selvitys maakaasun virtauksesta putkistossa, sekä maakaasun paineenvähennysaseman mitoituskriteereistä ja -tavoista. Tuloksena saatiin selvitettyä yhtälöt, joiden avulla mitoitus onnistuu. Mitoitusyhtälöt koottiin mitoitusohjelmiston avulla yhteen helppokäyttöiseen pakettiin, jonka avulla paineenvähennysaseman mitoitus saadaan suoritettua tarpeita vastaavalla tavalla ja pystytään valitsemaan oikean kokoiset paineenvähennyslaitteen komponentit. Eri laitteiden mitoistietojen koonti samaan ohjelmistoon nopeuttaa ja helpottaa paineenvähennysaseman laitteiden valintaa, eikä käyttäjän tarvitse enää mitoittaa jokaista komponenttia erikseen.

Ohjelmiston käyttöliittymästä tehtiin varsin pelkistetty ja yksinkertainen esitys, johon käyttäjän tulee vain syöttää tiedettyjä lähtöarvoja paineenvähennyslaitteen komponenttien laskentaan. Kuvakaappaus käyttöliittymästä on esitetty alla olevassa kuvassa 9. Ohjelmiston käyttö on varsin yksinkertaista, ja sen avulla saa helposti selvitettyä tarvittavat laite- ja putkikoot. Lasketut arvot myös tallentuvat automaattisesti Excel-taulukkoon yhteenvedon omaisesti, josta saatuja tuloksia on jälkikäteen helppo tarkastella.

DN	25	50	80	100	150	200	250
KG	605	2335	5194	8416	17471	27282	38425
Cg	575	2220	4937	8000	16607	25933	36525

**Kuva 9.** Mitoitusohjelmiston käyttöliittymä

Mitoitusohjelmiston avulla saatuja tuloksia verrattiin jo olemassa olevien paineenvähennysasemien mitoitus tietoihin ja laitevalintoihin. Lasketut arvot olivat pyöristysvirheet huomioonottaen samoja, kuin jo rakennettujen ja käytössä olevien paineenvähennysasemien mitoitus tiedot. Ohjelmiston avulla saadaan siis valittua oikean kokoiset laitteet paineenvähennysasemille. Ohjelmistosta saatavia tuloksia voidaan näin pitää luotettavina ja paikkansapitävinä.

Ohjelmisto on suunniteltu ja toteutettu vain maakaasun paineenvähennysasemien tarkasteluun. Ohjelmistoa voitaisiin kuitenkin pienin muutoksin soveltaa myös muiden, kuin maakaasun tarkasteluun. Muiden aineiden tarkastelun lisäksi ohjelmistoa voitaisiin kehittää lisäämällä siihen paineenvähennyslaitteiston osien sekä näiden osien asennustöiden hintoja. Näin sen avulla saataisiin tehtyä alustava kustannusarvio paineenvähennyslaitteesta ja -asemasta. Lisäksi ohjelmistoon voitaisiin lisätä aseman sähkökomponentit, niiden valinta- ja hintatiedot, saaden ohjelmistosta entistä käyttökelpoisemmän ja monipuolisemman. Näin mahdollistettaisiin aseman eri komponenttien mitoitus yhdellä samalla ohjelmistolla.

## 5 YHTEENVETO

Diplomityössä käsiteltiin maakaasun putkistovirtausta ja erityisesti maakaasun paineenvähennysaseman paineenvähennyslaitetta ja sen mitoitusohjelmaa. Työn päämääränä oli suunnitella ja toteuttaa mitoitusohjelma paineenvähennysaseman paineenvähennyslaitteelle. Työssä perehdyttiin maakaasun putkivirtaukseen sekä paineenvähennyslaitteiden eri osien toimintaan ja tarpeeseen.

Työn lopputuloksena saatiin toteutettua mitoitusohjelmisto, jonka avulla saadaan valittua sopivat osat paineenvähennyslaitteeseen. Mitoitusohjelmisto toteutettiin Microsoft Excelin ja Visual Basic –ohjelmointikielen avulla. Ohjelmistosta pyrittiin pitämään mahdollisimman selkeänä ja yksinkertaisena käyttöliittymältään, jotta sen käyttö ei vaatisi erillistä koulutusta. Ohjelmiston avulla voidaan mitoittaa kaikki paineenvähennyslaitteen eri osat samalla kertaa, tai vaihtoehtoisesti jokainen osa erikseen.

Maakaasun putkivirtauksen analysointi vaatii paikka paikoin hieman yksinkertaistuksia, sekä osa yhtälöistä on empiirisiin tutkimuksiin selvitettyjä. Kaikesta huolimatta tämän diplomityön tuloksena syntyneen paineenvähennyslaitteen mitoitusohjelman avulla saadaan mitoitettua paineenvähennyslaitteen eri osat tarpeeksi tarkasti, jotta oikeankokoisten osien valinta on mahdollista. Mitoitusohjelmasta saatuja tuloksia verrattiin jo olemassa olevien paineenvähennysasemien mitoitusohjelmiin ja laitevalintoihin, ja tulokset mitoitusohjelmiston ja jo olemassa olevien asemien välillä olivat yhtenäiset. Ohjelmalla laskettuja tuloksia voidaan siis pitää luotettavina ja paikkansapitävinä.

## LÄHTEET

A. J. Osiadacz. 1987. Simulation and analysis of gas networks. Houston: Gulf Publishing Company. ISBN 0-87201-844-X

Biotekniikan ja kemian tekniikan laitos. Kemian tekniikan korkeakoulu. Aalto-yliopisto. 2012. Kemian laitetekniikka 1 -kurssin virtaustekniikka-aineisto. [verkkodokumentti] Viitattu 17.12.2012. Saatavilla: [https://noppa.aalto.fi/noppa/kurssi/ke-42.1700/materiaali/KE-42\\_1700\\_prujut\\_2\\_2.pdf](https://noppa.aalto.fi/noppa/kurssi/ke-42.1700/materiaali/KE-42_1700_prujut_2_2.pdf)

Gasum Oy. 2012. Tuotetiedote. [verkkodokumentti] Viitattu 12.12.2012. Saatavilla: [http://www.gasum.fi/tuotteet/maakaasu/Documents/Maakaasun\\_tuotetiedote.pdf](http://www.gasum.fi/tuotteet/maakaasu/Documents/Maakaasun_tuotetiedote.pdf)

El Golli Rami, Bezian Jean-Jacques, Delenne Bruno, Menu Francois. 2006. Modelling of a pressure regulator. [verkkodokumentti]. Viitattu 16.1.2013. Saatavilla: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308016106001852>

Frank M. White. 2003. Fluid mechanics, fifth edition. New York: McGraw-Hill. ISBN 0-07-119911-X

J. Králik, P. Stiegler, Z. Vostrý, J. Závorka. 1988. Dynamic modeling of large-scale networks with application to gas distribution. Amsterdam: Elsevier Science Publishers. ISBN 0-444-98915-3

Neste Jacobs Oy. Natural gas projects, specification for regulating and metering stations, MK-107 rev. 8. [Neste Jacobsin intranetissä]

Pietro Fiorentini. 1996. Regolatore di pressione – Pressure regulator –katalogi.

Pietro Fiorentini. 2008. Slam shut valves. [verkkodokumentti]. Viitattu 20.01.2013. Saatavilla: [http://www.fiorentini.com/media/files/360\\_safety\\_devices\\_-\\_scn\\_-\\_eng\\_-\\_jul2008.pdf](http://www.fiorentini.com/media/files/360_safety_devices_-_scn_-_eng_-_jul2008.pdf)

Riikonen Arto. Tammikuu 1985. Maakaasun jakelutekniikka. Julkaisu M3.

Riikonen Arto. Heinäkuu 1993. Maakaasun ja nestekaasun koostumus ja ominaisuudet. Julkaisu M1, 2. painos. ISSN 0785-8183

Riikonen Arto. Helmikuu 1997. Maakaasun ja nestekaasun palaminen. Julkaisu M6, 2. painos. ISSN 0785-8183

SFS-EN 12186 Kaasuputkistot. Siirto- ja jakeluputkistojen paineenvähennysasemat. Toiminnalliset vaatimukset. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 2000.

Suomen Kaasuyhdistys ry. Maakaasukäsikirja. 2010. [verkkodokumentti]. Viitattu 18.9.2012. Saatavilla:  
[http://maakaasu.fi/sites/default/files/pdf/kasikirja/kasikirja\\_20110307.pdf](http://maakaasu.fi/sites/default/files/pdf/kasikirja/kasikirja_20110307.pdf)

Von Günter Cerbe, Hand-Peter Charles, Günter Knauf, Horst Köhler, Jürgen Lehmann, Horst Lethen, Horst Mauruschat. 1982. Grundlagen der Gastechnik. ISBN 3-446-13707-6

Willi Bohl. 1988. Teknillinen virtausoppi. ISBN 951-9405-28-3