

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

Konetekniikan koulutusohjelma

BK10A0401 Kandidaatintyö ja seminaari

**MAAKAASUN PAINEENVÄHENNYSASEMAN  
PAINEENVÄHENNYSLAITTEEN MITOITUSPERIAATTEET**

**PRINCIPLES OF DESIGNING A REGULATING UNIT OF NATURAL GAS  
PRESSURE REGULATING STATION**

## SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO .....	1
2	MAAKAASUN PAINEENVÄHENNYSASEMAN TOIMINTAPERIAATE .....	3
2.1	Maakaasuputkistot .....	5
2.2	Kaasumäärän mittaus .....	6
2.3	Paineenvähennysasema siirtoputkistossa.....	7
2.4	Paineenvähennysasema jakeluputkistossa .....	10
3	YLEISTEN MITOITUSPERIAATTEIDEN SOVELTAMINEN PAINEENVÄHENNYSASEMAN MITOITUKSEEN.....	12
3.1	Kaasun virtaus putkistossa.....	12
3.2	Putkistojen mitoitus .....	15
3.2.1	Painehäviö.....	15
3.2.2	Kaasuvirran nopeus ja tilavuusvirta.....	19
3.2.3	Putkiston seinämävahvuus .....	19
3.3	Säätöventtiilistön mitoitus .....	20
3.4	Lämmönvaihtimen mitoitus .....	22
3.5	Suodattimen mitoitus .....	22
4	TULOSTEN TARKASTELU.....	24
5	YHTEENVETO .....	25
	LÄHTEET.....	26

## 1 JOHDANTO

Tämä tutkielma on osa konetekniikan kandidaatintyö ja seminaari -kurssia. Tutkielmassa tutustutaan maakaasun paineenvähennysasemiin ja niiden toimintaperiaatteeseen kirjallisuuden avulla. Tutkielman pääpaino on paineenvähennysaseman mitoitusperiaatteiden selvittäminen. Tutkielman alussa esitellään paineenvähennysaseman toimintaperiaate ja tarve, sen eri osat ja niiden toiminta. Sen jälkeen käsitellään kaasun virtaustekniikkaa putkistossa sekä paineenvähennysaseman ja siihen liittyvän maakaasuputkiston mitoitusperiaatteita. Mitoituksen yhteydessä tutustutaan myös mitoituksen fysikaalisiin taustoihin. Tutkielman ulkopuolelle jätetään kaikki paineenvähennysaseman elektroniikka- ja sähkölaitteet.

Maakaasu on luonnonkaasua. 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. Julkaisu M1. 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>Urengoi</i>	<i>Saksa</i> <i>Goldenstedt</i>	<i>USA</i> <i>Kansas</i>	<i>Hollanti</i> <i>Groningen</i>	<i>Norja</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. Julkaisu M6. 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 noin 200 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).

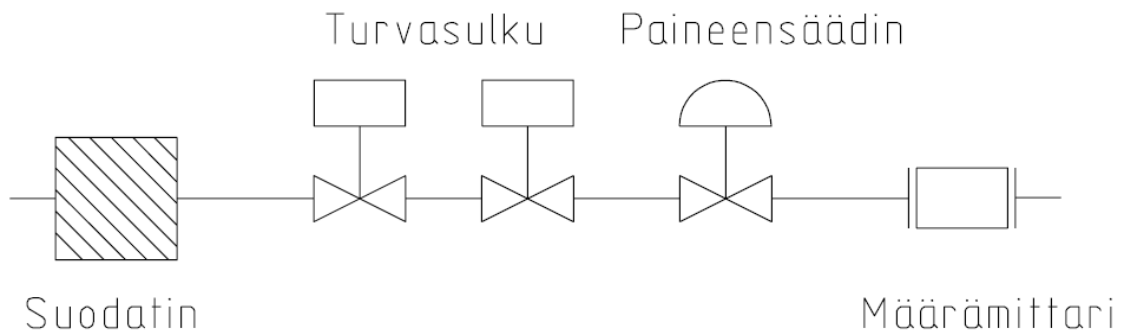
## **2 MAAKAASUN PAINEENVÄHENNYSASEMAN TOIMINTAPERIAATE**

Paineenvähennysaseman päätehtävät ovat kaasun paineenvähennys ja -säätö, läpimenevän maakaasumäärään mittaaminen, ylipaineen estäminen jakeluputkistossa ja kuluttajien laitteissa sekä kaasun hajustaminen. (El Golli et al. Modelling of a pressure regulator. 2006. s.1). Maakaasun ollessa normaalisti hajutonta ja väritöntä, hajustetaan se paineenvähennysasemilla, jotta mahdolliset vuodot asiakkaalla ja putkistossa olisi helpommin havaittavissa. Hajustamiseen käytetään rikkiptoisia hajusteita, yleisimmin tetrahydrotiofeenia (THT). (Riikonen. Julkaisu M1. 1993. s.38.)

Standardin SFS-EN 12186 mukaan kaasun paineenvähennysasemat tulee suunnitella ja rakentaa siten, että:

- aseman oikea toiminta on ympäristöolosuhteet huomioiden varmistettu
- aseman olennaiset komponentit ovat helposti luokse päästävässä kunnossapitoa ja käyttöä varten
- asema tai erilliset linjat voidaan sulkea venttiilien avulla
- jokainen asennettu linja, mukaan lukien varalla olevat linjat, täyttää standardin SFS-EN 12186 vaatimukset.

Paineenvähennysasema koostuu kaasun paineensäätöön ja ylipaineen suojaukseen liittyvistä laitteistoista tulo- ja lähtöputkistojen sulkuventtiileihin asti sekä kaikista rakenteista, joiden sisällä laitteisto sijaitsee. (SFS-EN 12186, 3.2.9). Paineenvähennysasemalla on paineensäätimen lisäksi myös suodatin, jonka tehtävänä on estää epäpuhtauksien pääsy paineensäätimeen. Maakaasu ei sisällä kiinteitä epäpuhtauksia, mutta rakennustöiden yhteydessä putkistoon voi jäädä epäpuhtauksia, jotka voivat tukkia paineensäätimen sinne kulkeutuessaan. (Riikonen. Julkaisu M3. 1985. s.21.) Kuvasta 1 nähdään periaatekuva maakaasun paineenvähennysasemasta ja kuvasta 2 miltä valmis siirtoputkistossa oleva paineenvähennysasema näyttää suojarakennuksen sisällä. Kuvassa 2 korkeapaineinen siirtoputkisto on punaista putkea ja keltainen on matalampipaineista jakeluputkea.



**Kuva 1.** Periaatekuva maakaasun paineenvähennysasemasta.

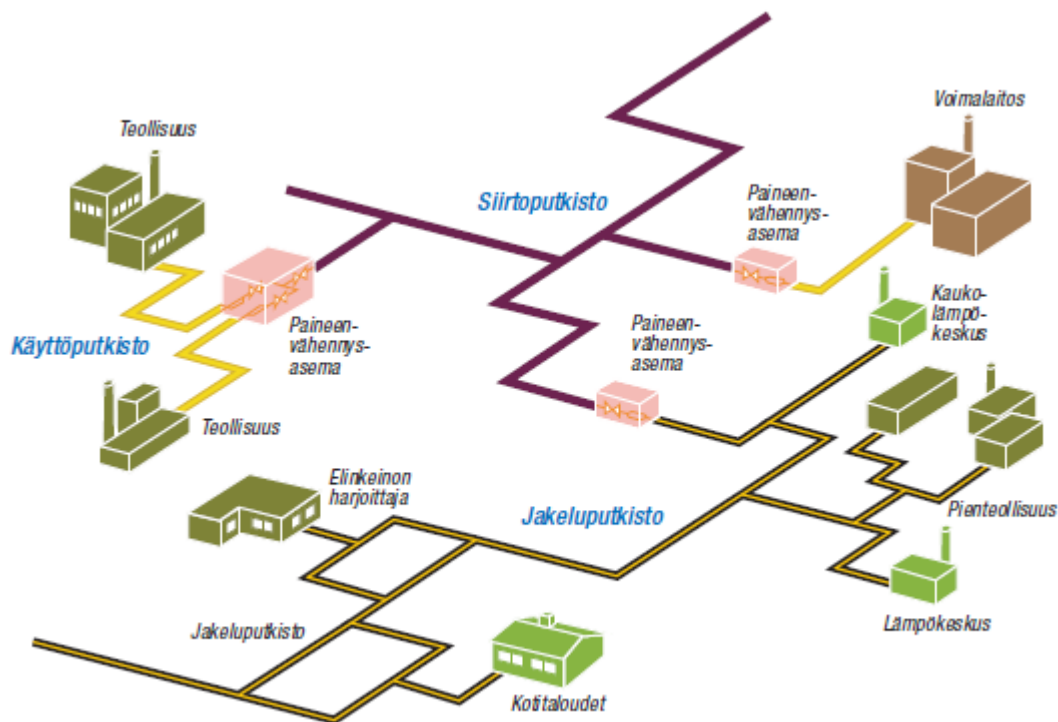


**Kuva 2.** Paineenvähennysaseman sisätilat

Maakaasun paineenvähennysasemilla siirtoputkistosta tuleva korkeapaineinen maakaasu alennetaan paineenvähennyslaitteen avulla käyttökohteen vaatimalle painetasolle. Yleensä paineenalennus suoritetaan moniportaisesti alentamalla ensin siirtoputkiston paine jakeluputkistolle sopivaksi ja jakeluputkiston paine lopulta kunkin käyttäjän kulutuslaitteelle sopivalle tasolle. (Maakaasukäsikirja 2010. s.58.)

## 2.1 Maakaasuputkistot

Maakaasuputkistot jaetaan käyttötarkoituksensa mukaan kolmeen ryhmään: siirtoputkistoon, jakeluputkistoon ja käyttöputkistoon. Kuvassa 3 nähdään havainnollistava esimerkki putkiston jaottelusta. Siirtoputkistossa maakaasua siirretään korkeapaineisena maanalaisen putkiston avulla lähelle käyttöalueita. Siirtoputkistossa kaasun paine on Suomessa 30–54 bar. Osa kaasuputkistosta on rakennettu 80 barin painetasolle, mutta kaikkia putkia käytetään edelleen 54 barin painetasolla. Maakaasun siirtoputket ovat lämpöeristämättömiä muovipinnoitettuja teräsputkia, joissa pinnoituksen tarkoituksena on suojata putkistoa korroosiolta yhdessä katodisen suojauksen kanssa. Siirtoputkistosta maakaasu siirtyy paineenvähennysaseman kautta matalampipaineiseen jakeluputkistoon, jossa kaasun paine on 1-8 bar. Jakeluputkistot ovat joko teräs- tai muoviputkia. Teollisuudessa, esimerkiksi kaasuturbiinivoimalaitoksilla, käyttöputkiston painetaso on 20–30 bar. (Riikonen. Julkaisu M3. 1985. s.2-4.)



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

## 2.2 Kaasumäärän mittaaminen

Maakaasumäärän mittaaminen perustuu virtaavan maakaasun tilavuusvirran mittaukseen. Mittaukseen voidaan käyttää kahta eri perusmenetelmää, joko suoraa tilavuusmittausta tai epäsuoraa tilavuusmittausta. Molemmissa menetelmissä on olemassa monia eri mittarityyppejä, jotka ominaisuuksiensa perusteella sopivat moniin eri kohteisiin. Osa soveltuu paremmin korkeisiin paineisiin ja tilavuusvirtoihin kun taas toiset pääsevät tarkempaan tulokseen pienillä tilavuusvirroilla. Mitattu tilavuusvirta täytyy vielä muuntaa normaaliolotilaan, jossa kaasun lämpötila on 0 °C ja paine 1,01325 bar. (Riikonen. Julkaisu M5. 1998. s.24–33.)

Suorassa tilavuusmittauksessa kaasu johdetaan tilaan, jonka tilavuus tunnetaan tarkasti. Kaasumäärä saadaan laskettua laskemalla tilan tyhjennysvaiheiden lukumäärä. Tällä tavoin toimivat muun muassa paljemittarit sekä kiertomäntämittarit. (Riikonen. Julkaisu M5. 1998. s.26.)

Epäsuorassa tilavuusmittauksessa seurataan jotakin kaasuvirtauksen synnyttämää fysikaalista suuretta, jonka suhde tilavuusvirtaan tiedetään ja sen perusteella saadaan laskettua virtaava kaasumäärä. Tällä tavoin toimii esimerkiksi turbiinimittari, jonka kaasuvirrasta johtuvaa turbiinin pyörimisnopeutta seuraamalla voidaan laskea tilavuusvirta. (Riikonen. Julkaisu M5. 1998. s.26.) Maakaasun siirtoputkiston yhteydessä olevilla paineenvähennysasemilla yleisin käytetty mittarityyppi on epäsuoraan tilavuusmittaukseen perustuva turbiinimittari.

Muita käytettyjä kaasumäärän mittaamenetelmiä ovat muun muassa ultraäänimittari, pyörremittari ja fluidistori. Ultraäänimittarin avulla seurataan äänisignaalin kulku-aikaa kaasuvirran läpi. Pyörremittarilla taas seurataan pyörteen taajuutta, jonka kaasuvirtaan sijoitettu estekappale aiheuttaa. Fluidistorissa seurataan Coanda-ilmiön värähtelytaajuutta, jonka kaasuvirtaus aiheuttaa. (Riikonen. Julkaisu M5. 1998. s.27.)



### 2.3 Paineenvähennysasema siirtoputkistossa

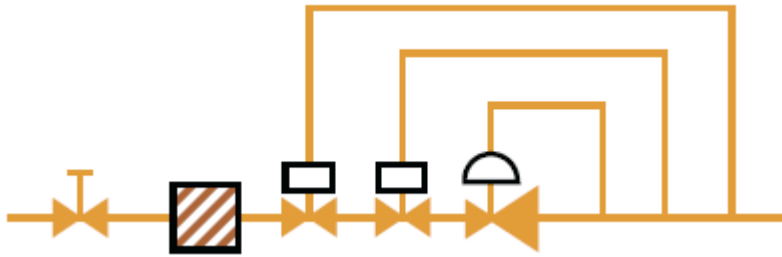
Siirtoputkistossa olevien paineenvähennysasemien tarkoituksena on alentaa siirtoputkistossa olevaa kaasun painetta (30...54 bar) jakeluputkistolle sopivaan paineeseen (1...8 bar). Siirtoputkistoissa olevat paineenvähennysasemat sijaitsevat usein suurten kaasunkäyttökeskittymien lähistöllä. Jakeluputkiston avulla niistä johdetaan kaasua teollisuuslaitoksille, lämpökeskuksille ja pienkuluttajille. Paineenvähennyslaitteisto siirtoputkistossa olevalla paineenvähennysasemalla on hyvin samanlainen kuin jakeluputkistossa oleva paineenvähennyslaitteisto. Jakeluputkistossa olevaan laitteistoon verrattuna siirtoputkistossa olevan paineenvähennysaseman varustelu on hieman monipuolisempi. (Riikonen. Julkaisu M3. 1985. s.19–20.)

Paineenvähennyslaitteisto koostuu paineensäätimestä sekä laitteistolle tulevan tulopaineen suuruudesta riippuen erinäisistä turvalaitteista kuten turvasulkuventtiili, varasäädin ja apuvaroventtiili. (Maakaasukäsikirja 2010 s.58). Edellä mainittujen ilman kaasun ulospuhallusta toimivien turvalaitteiden lisäksi turvajärjestelmä voidaan toteuttaa kaasun ulospuhalluksen kanssa varoventtiilin avulla. Täyskapasiteettista varoventtiiliä tulisi kuitenkin käyttää vain ilman ulospuhallusta olevien turvalaitteiden toisena turvalaitteena minimoiden ilmakehään puhallettavan kaasumäärän. (SFS-EN 12186. 8.3.2.)

Paineensäätö- ja varolaitteet tulee suunnitella, asentaa ja säätää niin, ettei kaasun paine ylitä paineenvähennyslaitteistossa ja siitä lähtevässä putkessa suurinta sallittua käyttöpainetta. Varolaitteina voidaan käyttää varasäädintä tai turvasulkuventtiiliä. Varolaitteiden tarve ja määrä on tapauskohtaista ja riippuu aina säätimelle tulevasta kaasun paineesta. Turvajärjestelmän tulee toimia automaattisesti paineensäätöjärjestelmän vikaantuessa estäen paineen nousun yli sallittujen rajojen. (SFS-EN 12186. 8.3.)

Turvajärjestelmää ei tarvita, jos kaasun maksimikäyttöpaine ennen säädintä on pienempi tai samansuuruinen kuin maksimihäiriöpaine säätimen jälkeen. Maksimihäiriöpaineella tarkoitetaan painetta, joka voi väliaikaisesti olla kaasujärjestelmässä häiriötapausten yhteydessä. Maksimikäyttöpaineen ollessa suurempi ennen säädintä kuin maksimihäiriöpaineen säätimen jälkeen, on säätimen yhteydessä oltava yksi turvajärjestelmä. Yhden turvajärjestelmän lisäksi

tarvitaan toinen turvalaite, kun maksimikäyttöpaineiden erotus ennen ja jälkeen säätimen ylittää 16 bar ja maksimikäyttöpaine ennen säädintä on suurempi kuin lujuuskoepaine säätimen jälkeen. (SFS-EN 12186. 8.3.3.) Kuvasta 4 nähdään esimerkkikuva paineenvähennyslaitteistosta kahdella turvalaitteella.



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

Paineenvähennyslaitteistot sijoitetaan tätä tarkoitusta varten rakennettuun yleisimmin teräsrakenteiseen suojarakennukseen, jossa usein on erillinen laitetila lämpökeskusta, sähkölaitteita ja käytön valvonnan viestilaitteita varten. (Riikonen. Julkaisu M3. 1985. s.19–20). Kuvasta 5 nähdään, miltä valmis paineenvähennysaseman suojarakennus näyttää.



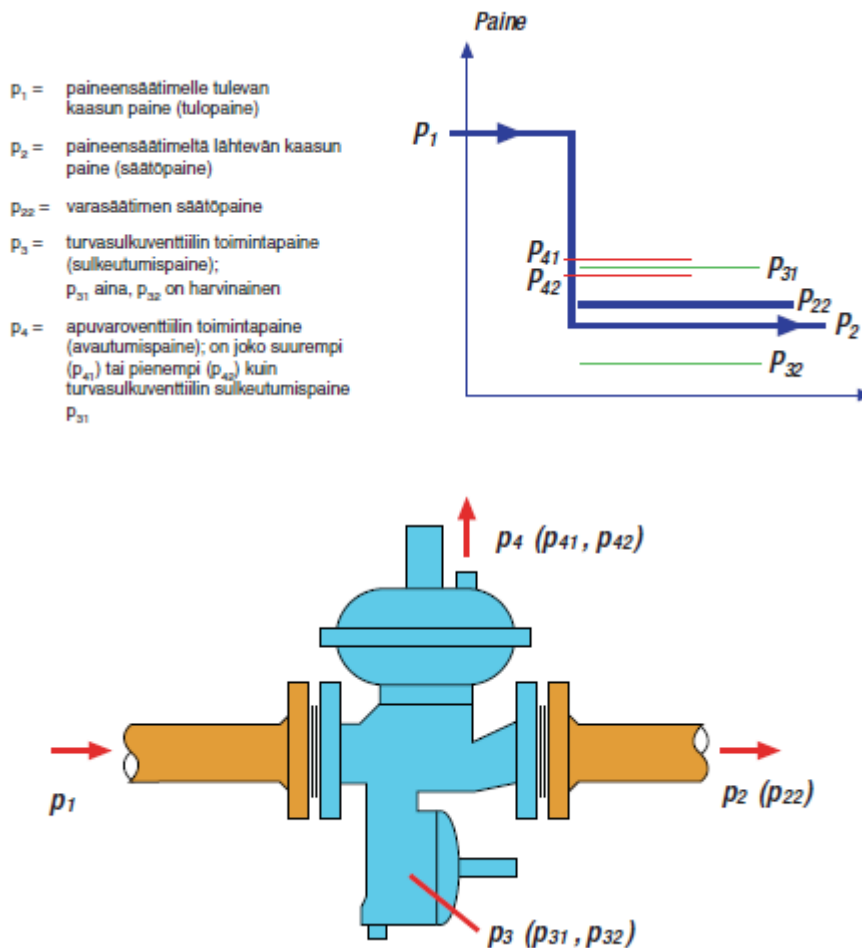
**Kuva 5.** Paineenvähennysaseman suojarakennus

Siirtoputkistossa oleva paineenvähennysasema eroaa jakeluputkistossa olevasta asemasta eniten siten, että siirtoputkistossa olevassa on yleensä kaksi täydellistä paineenvähennys- ja määrämittauslinjaa, jotka molemmat toimivat kaasun maksimitarpeella. Toinen linjoista on varalinjana ja toinen käytössä. (Riikonen. Julkaisu M3. 1985. s.21.)

Siirtoputkiston yhteydessä olevalla paineenvähennysasemalla tarvitaan myös lämmitin kaasulle. Kaasun lämpötila laskee paineen alentuessa, Joule-Thomson -ilmiön mukaisesti. Lämpötilan aleneminen riippuu kaasun paineesta, koostumuksesta sekä lähtölämpötilasta. Usein se on kuitenkin noin  $0,4...0,5$  °C/bar. Tarve lämmittämiselle tulee kaasun paineen alentuessa vähintään 20 bar. Lämmitys tapahtuu lämmönvaihtimella, jossa kiertää vesi tai vesiglykoliseos. (Riikonen. Julkaisu M3. 1985. s.21–22.) Vaihtoehtona lämmittämiselle voidaan kaasun joukkoon injektoida inhibiittoria, joka estää hydraatin muodostumisen. (SFS-EN 12186. 7.2). Inhibiittorin injektointi kaasun joukkoon on kuitenkin erittäin harvinainen ja vähän käytetty menetelmä.

## 2.4 Paineenvähennysasema jakeluputkistossa

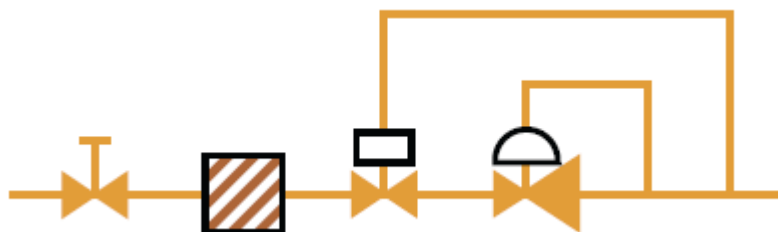
Jakeluputkistossa olevilla paineenvähennysasemilla kaasun paine alennetaan jakeluputkiston paineesta (1...8 bar) pienkulutuksen vaatimalle tasolle. Paineenvähennyslaitteisto koostuu siirto-putkistossa olevan paineenvähennyslaitteiston tavoin paineensäätimestä (Kuva 6) sekä laitteistolle tulevan tulopaineen suuruudesta riippuen erinäisistä turvalaitteista kuten turvasulkuventtiili, varasäädin ja apuvaroventtiili. Usein kaikki turvalaitteet ovat sijoitettu samaan laiterunkoon paineensäätimen kanssa. (Maakaasukäsikirja 2010 s.58.)



**Kuva 6.** Paineensäädin (Maakaasukäsikirja 2010. s.60)

Samoin kuin siirto-putkiston yhteydessä olevassa paineenvähennysasemassa turvajärjestelmää ei tarvita, jos kaasun maksimikäyttöpaine ennen säädintä on pienempi tai samansuuruinen kuin maksimihäiriöpaine säätimen jälkeen tai jos maksimikäyttöpaine ennen säädintä on alle 100

mbar. Maksimikäyttöpaineen ollessa suurempi ennen säädintä kuin maksimihäiriöpaineen säätimen jälkeen, on säätimen yhteydessä oltava yksi turvajärjestelmä. Kuvassa 7 on esimerkkikuva paineenvähennyslaitteistosta yhdellä turvalaitteella. (SFS-EN 12186. 8.3.3.)



**Kuva 7.** Paineenvähennyslaitteisto yhdellä turvalaitteella. Turvasulkuventtiili ja paineensäädin (Maakaasukäsikirja 2010. s.63)

Paineensäätöventtiilien rakenteet ja toimintaperiaatteet ovat valmistajakohtaisia, mutta yleisesti samaan laiterunkoon on sijoitettu paineensäätimen lisäksi muitakin laitteita, kuten turvasulku- ja apuvaroventtiilit sekä painemittaus. (Riikonen. Julkaisu M5. 1998. s.15).

Yksinkertaisimmillaan paineensäätöventtiilinä on jousivoimaviritteinen paineensäädin, jota ohjaa venttiililtä lähtevän putkiston säätöpaine. Vaativammissa kohteissa, joissa on suuria paine-eroja tai kaasun virtaus vaihtelee laajalla alueella, käytetään pilottiohjattua paineensäätöventtiiliä. Pilottiohjatulla paineensäätöventtiilillä tarkoitetaan sellaista paineensäätöventtiiliä, jossa varsinaista paineensäätöventtiiliä ohjataan toisella huomattavasti pienemmällä paineensäätöventtiilillä (pilottiventtiilillä). Pilottiventtiiliä ohjaa säätöventtiililtä lähtevän kaasuputkiston säätöpaine ja pilottiventtiili säätelee varsinaisen venttiilin kalvokammion työpainetta. Työpaineen ollessa suurempi kuin kaasuputkiston säätöpaine saadaan säätöventtiili reagoimaan herkemmin ja tarkemmin kaasuvirran muutoksiin. (Riikonen. Julkaisu M5. 1998. s.15–16.)

### **3 YLEISTEN MITOITUSPERIAATTEIDEN SOVELTAMINEN PAINEEVÄHENNYSASEMAN MITOITUKSEEN**

Maakaasuputkiston ja paineenvähennysaseman mitoitus perustuu normaalisti välitettävään ainemäärään, painetasoon, painehäviöön sekä putkiston pituuteen. Monesti putkistojen ja paineenvähennysasemien mitoitukset tehdään kokemukseen perustuen, jonka jälkeen tarkistetaan, että mitoitukset täyttävät halutut kriteerit sekä kuinka suuri on kaasuvirtaamalla tapahtuva painehäviö. Mitoitus voidaan suorittaa myös toisin päin laskemalla valitun putkiston antama kaasumäärä sallitulla painehäviöllä ja sen jälkeen verrata saatua tulosta haluttuun kaasumäärään. (Riikonen. Julkaisu M5. 1998. s.35.)

Laskennassa käytetään yleensä likimääräisiä laskentakaavoja ja -ohjelmia. Likimääräistenkin kaavojen antama tarkkuus on yleensä riittävä, sillä käytännössä putkikoko valitaan aina varman päälle. Varsinkin lyhyillä etäisyyksillä putkiston osien ylimitoituksella ei ole suurta merkitystä rakentamisen kokonaiskustannuksiin. Lisäksi ylimitoitus on aina turvallisempaa, kuin alimitoitus. (Riikonen. Julkaisu M5. 1998. s.35.)

Mitoittavana kaasumääränä käytetään sitä yhteistehoa, jossa kaikkien käytössä olevien laitteiden käyttämä kaasumäärä on laskettu yhteen. Mikäli yhden paineensäätöjärjestelmän päässä on useita kaasun käyttölaitteita, valitaan paineensäätimeltä lähtevä putkisto yhtä nimelliskokoa suuremmaksi kuin laskennan perusteella valittaisiin. (Riikonen. Julkaisu M5. 1998. s.35.)

Maakaasuputkisto täytyy suunnitella siten, ettei kaasun virtausnopeus ylitä 20 m/s mittaus- ja säätöjärjestelmissä eroosion ja virtauksen aiheuttaman melun ja värähtelyn estämiseksi. (SFS-EN 15001-1. 6.3.2).

#### **3.1 Kaasun virtaus putkistossa**

Kaasun virratessa kaasuputkistossa on kyseessä paisuntavirtaus, koska paine alenee virtaussuunnassa kitkahäviöiden takia. Yleisesti muuttuvat myös paine, lämpötila, tiheys sekä virtausnopeus. 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. Maakaasuputkistojen ollessa useimmiten paljaita eristämättömiä putkia, tapahtuu putken seinämän läpi lämmönsiirtoa. Kaasun lämpötila tasaantuu virratessa vähitellen ympäristön lämpötilaan. Virtausta voidaan näin kutsua isotermiseksi. (Bohl. Teknillinen virtausoppi 1988. s.171.)

Virtaukset voidaan jakaa ryhmiin niiden virtausmuotojen perusteella. Eri virtausmuodot voidaan määrittellä Reynoldsin luvun perusteella, jolloin virtaukset voidaan jakaa joko laminaariseen tai turbulenttiseen virtaukseen. Putkivirtaukset, joissa Reynoldsin luku jää alle kriittisen rajan, joka on 2320, ovat laminaarisia virtauksia ja ylimenevät ovat turbulenttisia virtauksia. Laminaarisessa virtauksessa osaset liikkuvat kerroksittain pitkin putken pituusakselin suuntaisia virtaviivoja, eivätkä ne sekoitu keskenään. Turbulenttisessa virtauksessa esiintyy pyörteitä ja osaset sekoittuvat keskenään. (Bohl. Teknillinen virtausoppi. 1988. s.85.) Käytännössä laminaarinen virtaus on melko harvinainen, sillä se vaatii suhteessa matalan virtausnopeuden. (von Günter et al. Grundlagen der Gastechnik. 1982. s.103).

Ideaalikaasun tilanyhtälö voidaan ilmaista yhtälön 1 tavoin. Siinä  $P$  on paine,  $m$  on massa,  $R$  on kaasuvakio ja  $T$  on lämpötila.

$$\frac{P}{m} = RT \quad (1)$$

Maakaasun ollessa sekoitus monia eri kaasuja, kuten metaania, etaania ja typpeä, ei tilanyhtälönä voida käyttää ideaalikaasun tilanyhtälöä suoraan. Reaalikaasujen tapauksessa ideaalikaasujen tilanyhtälöön tulee lisätä kokoonpuristuvuuskerroin  $z$ , jolloin yhtälöstä tulee yhtälön 2 mukainen.

$$\frac{P}{m} = zRT, \quad (2)$$

missä  $z$  on kokoonpuristuvuuskerroin.

Kokoonpuristuvuuskerroin on käytännössä muiden tilanmuuttujien funktio ja on näin ollen riippuvainen kaasun fysikaalis-kemiallisominaisuuksista. Tarkkaa teoreettista määritelmää ei kokoonpuristuvuuskertoimelle ole, mutta sen riippuvuus fysikaalis-kemiallisominaisuuksien, paineen ja lämpötilan suhteen on todettu empiirisesti. Kaasuseosten, kuten maakaasun, tapauksessa riippuvuuden määrittäminen on vaikeampaa kuin yksittäiselle kaasulle. Yleisin yhtälö kokoonpuristuvuuskertoimen määrittämiseen on yhtälön 3 mukainen. (Králik et al. Dynamic modeling of large-scale networks with application to gas distribution. 1988. s.57.)

$$z = 1 + aP + b\frac{P}{T}, \quad (3)$$

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

Tutkimustensa mukaan Králik et al julkaisussaan Dynamic modeling of large-scale networks with application to gas distribution kuitenkin toteavat hieman muokatun version yhtälöstä 3 olevan parempi vaihtoehto maakaasun kokoonpuristuvuuskertoimen määrittämiseksi. Muokattu yhtälö on yhtälön 4 mukainen. (Králik et al. Dynamic modeling of large-scale networks with application to gas distribution. 1988. s.76.)

$$z = 1 + \frac{a}{P_{kri}} P + \frac{bT_{kri}}{P_{kri}} \frac{P}{T} \quad (4)$$

Yhtälöissä 3 ja 4  $P_{kri}$  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. (Králik et al. Dynamic modeling of large-scale networks with application to gas distribution. 1988. s.58.)



### 3.2 Putkistojen mitoitus

Putkistoissa olevan kokoonpuristuvan virtauksen jatkuvuus voidaan ilmaista massan säilymisperiaatteen avulla yhtälön 5 mukaisesti.

$$\dot{m} = A_1 w_1 \rho_1 = A_2 w_2 \rho_2 = A w \rho = \text{vakio}, \quad (5)$$

jossa  $A$  on putken poikkipinnan pinta-ala,  $w$  nopeus ja  $\rho$  tiheys. (Bohl. Teknillinen virtausoppi. 1988. s.168.)

#### 3.2.1 Painehäviö

Kaasuputkiston mitoituksessa painehäviö on merkittävä mitoituskriteeri. Putkistossa syntyvään painehäviöön vaikuttavat muun muassa seuraavat asiat:

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

Tarkka painehäviön laskenta on harvoin perusteltua, sillä se on verrattain hankalaa koska maakaasu on kokoonpuristuvaa. Painehäviön laskemisen yksinkertaistamiseksi voidaan olettaa kaasuvirran olevan vakaa, jolloin virtaus ei muutu ajan suhteen. (Králik et al. Dynamic modeling of large-scale networks with application to gas distribution. 1988. s.282.) Näin voidaankin kirjoittaa jatkuvuusyhtälö yhtälön 6 mukaiseen muotoon.

$$\frac{\partial \rho w}{\partial x} = 0, \quad (6)$$

missä  $\rho$  on kaasun tiheys.

Yhtälön 6 perusteella voidaan sanoa, että  $\frac{\partial M}{\partial x} = 0$ , jolloin jatkuvuusyhtälö voidaan ilmaista myös yhtälön 7 tavoin.

$$\sum M_{IN} - \sum M_{OUT} = 0, \quad (7)$$

jossa  $M_{IN}$  on sisääntuleva massavirta ja  $M_{OUT}$  on ulosmenevä massavirta.

Liiketyhtälöstä voidaan jättää termi  $\frac{\partial \rho w^2}{\partial x}$  huomiotta, sillä sen vaikutus on olematon. (Králik et al. Dynamic modeling of large-scale networks with application to gas distribution. 1988. s.283). Liiketyhtälöstä tulee näin yhtälön 8 mukainen.

$$\frac{\partial P}{\partial x} + \rho g \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\lambda \rho |w| w}{2D} = 0, \quad (8)$$

missä  $\lambda$  on virtausvastuskerroin.

Sijoittamalla massavirran sekä tiheyden yhtälöt yhtälöön 8 tulee siitä yhtälön 9 mukainen.

$$\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\lambda z RT |M| M}{2PS^2 D} + g \frac{P}{zRT} \frac{\partial h}{\partial x} = 0, \quad (9)$$

jossa  $S$  on putken poikkipinta-ala

Putkiston ollessa vaakatasossa voidaan liiketyhtälössä oleva  $\frac{\partial h}{\partial x}$  asettaa nolllaksi. Tällöin yhtälöstä

9 tulee integroinnin jälkeen yhtälön 10 mukainen.

$$P_{IN}^2 - P_{OUT}^2 = \frac{\lambda z RT |M| ML}{DS^2} \quad (10)$$

Kalteville putkistoille, joissa  $\frac{\partial h}{\partial x}$  ei ole nolla, saadaan yhtälön 9 integroinnin jälkeen yhtälön 11 mukainen yhtälö.

$$P_{IN}^2 - e^a P_{OUT}^2 = \frac{\lambda z RT |M| ML}{DS^2} \frac{e^a - 1}{a}, \quad (11)$$

$$\text{missä } a = \frac{2g\Delta h}{zRT}$$

Maclaurin sarjan mukaan voidaan  $e^a$  avata muotoon  $e^a = 1 + \frac{a}{1!} + \frac{a^2}{2!}$ , jolloin yhtälö 11 voidaan kirjoittaa yhtälön 12 mukaisesti.

$$P_{IN}^2 - P_{OUT}^2 = \frac{\lambda z RT |M| ML}{DS^2} \left(1 + \frac{a}{2}\right) + P_{OUT}^2 a \left(1 + \frac{a}{2}\right) \quad (12)$$

Yhtälöstä 12 saadaan ulostuleva paine  $P_{OUT}$  laskettua, jolloin yhtälöstä tulee yhtälön 13 mukainen.

$$P_{OUT} = \sqrt{\frac{P_{IN}^2 - \frac{\lambda z RT |M| ML}{DS^2} \left(1 + \frac{a}{2}\right)}{1 + a \left(1 + \frac{a}{2}\right)}} \quad (13)$$

Yhtälön 12 avulla saadaan myös laskettua kaasun massavirta yhtälön 14 tavoin.

$$|M| = \sqrt{\frac{P_{IN}^2 - P_{OUT}^2 (1 + a(1 + \frac{a}{2}))}{\frac{\lambda z RT}{DS^2} (1 + \frac{a}{2})}} \quad (14)$$

Virtausvastuskerroin  $\lambda$  on riippuvainen Reynoldsin luvusta, joka saadaan laskettua yhtälön 15 tavoin.

$$Re = \frac{wD\rho}{\mu}, \quad (15)$$

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

Laminaariselle virtaukselle ( $Re < 2320$ ) virtausvastuskerroin saadaan laskettua yhtälön 16 mukaisesti.

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (16)$$

Turbulenttiselle virtaukselle ( $Re > 2320$ ) virtausvastuskertoimen määrittäminen on vaikeampaa, kuin laminaariselle virtaukselle. Empiiristen kokeiden perusteella on saatu monia hieman toisistaan poikkeavia yhtälöitä virtausvastuskertoimelle turbulenttisessä virtauksessa. Králik et al julkaisussaan Dynamic modeling of large-scale networks with application to gas distribution toteavat yhtälön 17 mukaisen version olevan paras approksimaatio virtausvastuskertoimen määrittämiseen turbulenttisessä virtauksessa. (Králik et al. Dynamic modeling of large-scale networks with application to gas distribution. 1988. s.286.)

$$\lambda^{-1/2} = -2 \log\left(\frac{4,518}{Re} \log \frac{Re}{7} + \frac{k}{3710D}\right), \quad (17)$$

missä  $k$  on putken sisäpinnan karheus.

### 3.2.2 Kaasuvirran nopeus ja tilavuusvirta

Kaasuvirran nopeus saadaan laskettua yhtälön 18 avulla.

$$w_1 = \sqrt{\frac{(p_1^2 - p_2^2)d}{\lambda l \rho_1 p_1}} \quad (18)$$

Kaasuvirran nopeuden ollessa selvillä voidaan tilavuusvirta laskea putken poikkipinta-alan ja virtausnopeuden avulla yhtälön 19 mukaisesti.

$$\dot{V} = Aw = \frac{d^2 \pi}{4} w \quad (19)$$

### 3.2.3 Putkiston seinämävahvuus

Suoran putken seinämävahvuuden määrittäminen normaalioloissa tapahtuu yhtälön 20 tavoin maakaasun käyttöputkistoille maksimikäyttöpaineen ollessa yli 15 bar.

$$T_{\min} = \frac{DP * D}{20 * f_0 * R_{t0,5}(\theta)}, \quad (20)$$

jossa  $T_{\min}$  on minimi seinämävahvuus,  $DP$  on suunnittelupaine,  $D$  on putken ulkohalkaisija,  $f_0$  on suunnittelukerroin,  $R_{t0,5}(\theta)$  on määritelty myötölujuuskerroin suunnittelulämpötilassa. (SFS-EN 1594:2009. 7.2.1.)

Käyrien, joiden taivutussäde on alle 20 kertaa putken halkaisija, minimiseinämävahvuus lasketaan yhtälöiden 21 ja 22 tavoin. Yhtälöstä 21 saadaan käyrän sisäkurvin minimiseinämävahvuus ja yhtälöstä 22 ulkokurvin minimiseinämävahvuus.

$$T_{\min} = \frac{2R - 0.5D}{2R - D} * \frac{DP * D}{20 * f_0 * R_{t0,5}(\theta)} \quad (21)$$

$$T_{\min} = \frac{2R + 0,5D}{2R + D} * \frac{DP * D}{20 * f_0 * R_{t0,5}(\theta)}, \quad (22)$$

jossa  $R$  on käyrän säde käyrän keskiviivaa pitkin millimetreissä. (SFS-EN 1594:2009. 7.2.2.)

### 3.3 Säätöventtiilistön mitoitus

Kaikissa säätöventtiilityypeissä toiminta-arvot, säätöpaineet ja turvasulun sulkeutumispaineet ovat säädettävissä. Samaa venttiilirunkoa voidaan siis käyttää hyvin laajalla teho- ja painealueella. Lähtötietoja oikean venttiilin valintaan tarvitaan kuitenkin jonkin verran. Venttiiliä valittaessa on syytä olla selvillä muun muassa venttiilin läpivirtaavan kaasun maksimivirtausmäärä, kaasun normaali-, minimi- ja maksimitulopaine sekä säätö- ja turvasulkuventtiilin toimintapaine. Niin ikään on syytä olla selvillä mahdollisen apuvaroventtiilin tarve ja sen avautumispaine, suodattimen tarve, käyttölämpötila sekä liitostapa toivottuun putkikokoon. (Riikonen. Julkaisu M5. 1998. s.19.)

Tarvittavan säätöventtiilin laitekoon laskemiseksi tarvitaan tulo- ja lähtöpaine sekä tilavuusvirta. Näillä tiedoilla voidaan laskea kerroin  $KG$ , jonka avulla saadaan venttiilivalmistajien taulukoiden avulla valittua oikea laitekoko. Kerroin  $KG$  vastaa maakaasun liikemäärää kriittisissä olosuhteissa säätimen ollessa täysin auki. Vastaavasti laitevalmistajien taulukoista voidaan katsoa säätöventtiilin kerroin  $KG$  ja laskea sen avulla tilavuusvirta  $Q$ . (Pietro Fiorentini. Pressure regulator. 1996. s.4-5.)

Ei-kriittisissä olosuhteissa tulopaineen ollessa pienempi kuin  $2 * P_{OUT}$  voidaan kerroin  $KG$  laskea yhtälön 23 mukaisesti.

$$KG = \frac{Q}{\sqrt{P_{OUT}(P_{IN} - P_{OUT})}} \quad (23)$$

Vastaavasti samasta kaavasta saadaan tilavuusvirta  $Q$  selville yhtälön 24 mukaisesti, jos tiedetään kerroin  $KG$ .

$$Q = KG\sqrt{P_{OUT}(P_{IN} - P_{OUT})} \quad (24)$$

Kriittisissä olosuhteissa tulopaineen ollessa suurempi kuin  $2*P_{OUT}$  voidaan kerroin  $KG$  laskea yhtälön 25 mukaisesti.

$$KG = \frac{2Q}{P_{IN}} \quad (25)$$

Tilavuusvirta  $Q$  saadaan laskettua yhtälöstä 25 yhtälön 26 mukaisesti.

$$Q = \frac{KG}{2} P_{IN} \quad (26)$$

Jotta saavutetaan hyvä suorituskyky sekä vältetään eroosio ja suuri äänenvoimakkuus, on kaasun ulospuhallusnopeus pidettävä alle 150 m/s. (Pietro Fiorentini. Pressure regulator. 1996. s.6). Kaasun nopeus voidaan laskea yhtälön 27 avulla.

$$V = 345,92 \frac{Q}{DN^2} \frac{1 - 0,002P_{OUT}}{1 + P_{OUT}}, \quad (27)$$

missä  $DN$  on säätimen koko millimetreissä.

Niin säätöventtiileiden, kuin muidenkin putkistoon kuuluvien rakenneosien kertavastusten aiheuttamien painehäviöiden laskeminen teoreettisesti on hankalaa. Usein joudutaan turvautumaan kokeisiin, joissa selvitetään osien aiheuttama virtausvastus. Säätöventtiilistön painehäviö voidaan laskea yhtälön 28 avulla. Kertavastuskerroin  $\zeta$  riippuu osan, tässä tapauksessa säätöventtiilin, rakenteesta sekä Reynoldsin luvusta. (Bohl. Teknillinen virtausoppi. 1988 s.105.)

$$\Delta p_v = \zeta \frac{\rho}{2} \bar{w}^2 \quad (28)$$

Turvasulkuventtiilin painehäviö voidaan laskea kaavan 29 mukaisesti.

$$\Delta p = \frac{K_G P_{IN} - \sqrt{(K_G^2 P_{IN}^2 - 4Q^2)}}{2K_G}, \quad (29)$$

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

### 3.4 Lämmönvaihtimen mitoitus

Kaasun lämpötila laskee paineen alentuessa Joule-Thomson -ilmiön mukaisesti. Lämpötilan aleneminen riippuu kaasun paineesta, koostumuksesta sekä lähtölämpötilasta. Usein se on kuitenkin noin 0,4...0,5 °C/bar. Lämmönvaihtimelta vaadittu lämmitysteho saadaan laskettua yhtälön 30 avulla. (von Günter et al. Grundlagen der Gastechnik. 1982. s.157.)

$$\Phi = \dot{V}_n C_p \left[ (p_1 - p_2) \frac{dt}{dp} + (t_2 - t_1) \right], \quad (30)$$

jossa  $\dot{V}_n$  on kaasun maksimi tilavuusvirta ja  $C_p$  kaasun ominaislämpö

### 3.5 Suodattimen mitoitus

Suodattimena käytetään pystysuorassa olevaa suodatinta vaihdettavilla suodatinosilla. Suodattimen tarkoituksena on poistaa maakaasun seasta kiinteät partikkelit sekä nestemäiset aineet kuten pienet öljy-, metanoli- ja vesipisarat. Maakaasun painehäviö suodattimessa ei saa olla suurempi, kuin 100 mbar. Taulukosta 2 nähdään suodattimien suodatusarvoja eri käyttökohteissa.



**Taulukko 2.** Suodattimien suodattavuusarvoja (Neste Jacobs Oy. Specification for regulating and metering stations - MK-107)

<b>Lämmönvaihtimet</b>		
	<b>Koko</b>	<b>Suodattavuus</b>
Kiinteät partikkelit	2...8 µm	99,0 %
	> 8 µm	100 %
<b>Kaasuturbiinit</b>		
	<b>Koko</b>	<b>Suodattavuus</b>
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>		
	<b>Koko</b>	<b>Suodattavuus</b>
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 %

## 4 TULOSTEN TARKASTELU

Tutkielman tavoitteena oli selvittää maakaasun paineenvähennysaseman toimintaa sekä sen mitoitusperiaatteita. Tutkielmasta saa käsityksen siitä, mitä maakaasun paineenvähennysasemat ovat, mikä on niiden tarkoitus sekä miten maakaasuputkiston ja paineenvähennysaseman mitoitus tapahtuu ja mitä kaikkea siihen vaaditaan. Maakaasuputkiston ja -laitteiston suunnittelussa on otettava huomioon putkistojen ja eri laitteiden luomien fyysisten rajoitusten lisäksi standardeista tulevat vaatimukset.

Mitoitusta varten täytyy paikka paikoin tehdä yksinkertaistuksia maakaasun kokoonpuristuvan virtauksen johdosta. Yksinkertaistuksista huolimatta mitoituksessa päästään melko tarkkoihin lopputuloksiin ja tulokset ovat tarpeeksi tarkkoja putken ja paineenvähennysaseman suunnittelun kannalta.

Osa esitetyistä mitoitusyhtälöistä pohjautuu empiirisiin testeihin ja näin monista eri lähteistä tietoa etsiessä mitoitusyhtälöistä löytyi monia hieman toisistaan eroavia variaatioita.

## **5 YHTEENVETO**

Tässä tutkielmassa tutustuttiin kirjallisuuden sekä standardien avulla maakaasun siirto- ja jakeluputkiston yhteydessä oleviin paineenvähennysasemiin ja niiden suunnitteluun, sekä selvitettiin mitä laitteita ja komponentteja paineenvähennysasemat pitävät sisällään. Tutkielmassa käsitellään eri laitteiden toimintaa ja tarvetta sekä myös maakaasun virtausta kaasuputkistossa.

Paineenvähennysaseman toimintaperiaatteen selvityksen sekä sen eri laitteiden esittelyjen jälkeen tutkielmassa perehdytään eri laitteiden sekä maakaasuputkiston mitoitukseen. Tutkielmassa selvitetään aseman laitteiden mitoitusperiaatteita ja -yhtälöitä sekä käydään läpi niiden fysikaalista taustaa.

## LÄHTEET

Gasum Oy. Maakaasun siirtoverkosto. [verkkodokumentti]. Viitattu 17.9.2012. Saatavilla: <http://www.gasum.fi/kaasuverkostot/siirto/Sivut/default.aspx>

El Golli Rami, Bezia Jean-Jacques, Delenne Bruno, Menu Francois. 2006. Modelling of a pressure regulator. [verkkodokumentti]. Viitattu 19.9.2012. Saatavilla: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308016106001852>

Jaroslav Králik, Petr Stiegler, Zdenek Vostrý, Jiri Závorka. 1988. Dynamic modeling of large-scale networks with application to gas distribution. Elsevier. 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 25.10.2012. 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

Riikonen Arto. Tammikuu 1998. Kaasun käyttökohteiden putkistot sekä käyttölaitteiden sijoittaminen ja varustelu, Julkaisu M5, 3. painos. ISSN 0785-8183

SFS-EN 1594 Kaasuputkistot. Maksimikäyttöpaine yli 15 bar. Toiminnalliset vaatimukset. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 2009.

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

SFS-EN 15001-1 Kaasuputkistot. Kaasun käyttöputkistot teollisuudessa, käyttöpaineen ollessa yli 0,5 bar sekä teollisuudessa ja muualla käyttöpaineen ollessa yli 5 bar. Osa 1. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 2010.

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, Hans-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