

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0201 Energiatekniikan kandidaatintyö ja seminaari

Paine-eroon perustuvat virtausmittarit

Differential Pressure Flow Meters

Työn tarkastaja: Pekka Punnonen

Työn ohjaaja: Pekka Punnonen

Lappeenranta 6.4.2016

Atte Korhonen

## **TIIVISTELMÄ**

Opiskelijan nimi: Atte Korhonen

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Opinnäytetyön ohjaaja: Pekka Punnonen

Kandidaatintyö 2016

41 sivua ja 16 kuvaa

Hakusanat: Paine-ero, virtausmittaus, V-Cone, kuristuslaippa, venturiputki, suutin

Virtausmittaukseen on useita tekniikoita ja erilaiset virtausmittausmittarit ovat yleistyneet, mutta paine-eroon perustuvat virtausmittaustekniikat säilyttäneet asemansa teollisuuden uusissakin sovelluskohteissa. Tässä työssä keskitytään paine-eroon perustuviin virtausmittareihin. Työssä käsitellään kuristuslaippaa, venturiputkea, suuttimia, Wafer-Conea sekä V-Conea.

Uudet paine-eroon perustuvat tekniikat, kuten V-Cone, ovat saaneet jo markkinaosuutta tietyillä teollisuuden aloilla. Kattavaa suomenkielistä tutkimusta uusista paine-eroon perustuvista virtausmittareista ei ole tehty, joten tämä kandidaatintyö pyrkii avustamaan tässä tehtävässä ja ohjaamaan virtausmittarin valintaa erilaisissa putkivirtauksissa.

Tämän työn tekemisessä on hyödynnetty materiaalia erilaisista lähteistä, ja saatua tietoa on pyritty analysoimaan kriittisesti. Vanhempien tekniikoiden teoria ja toiminta on standardoitu ISO-standardissa 5167. Koska tässä paine-eroon perustuvien mittareiden standardissa ei ole vielä osaa uudemmille virtausmittareille, pääosa uusien tekniikoiden luottavuudesta on tutkimustiedon varassa.

Uudet virtausmittarit tarjoavat kuitenkin kokonaisvaltaisia parannuksia vanhojen tekniikoiden puutteisiin, mutta ne kaipaavat standardointia luotettavuuden parantamiseksi sekä tutkimuksia ongelmallisissa olosuhteissa, kuten kosteassa kaasuvirtauksessa. Optimaalinen ratkaisu riippuu aina virtausolosuhteista, fluidin ominaisuuksista sekä halusta mittaustarkkuudesta.

# SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä

Sisällysluettelo

<b>Symboli- ja lyhenneluettelo</b>	<b>4</b>
<b>1 Johdanto</b>	<b>6</b>
<b>2 Virtausmittaus yleisesti</b>	<b>7</b>
<b>3 Paine-eroon perustuvien virtausmittareiden teoria</b>	<b>10</b>
<b>4 Paine-eroon perustuvat mittarit yleisesti</b>	<b>12</b>
4.1 Paine-eroon perustuvat virtausmittarit .....	12
4.2 Kuristuslaippa eli mittalaippa.....	13
4.3 Wafer-Cone .....	16
4.4 Venturiputki.....	17
4.5 Suuttimet .....	19
<b>5 V-Cone</b>	<b>21</b>
5.1 Rakenne ja kiinnittäminen.....	21
5.2 Tilavuusvirran mittaaminen V-Conella.....	22
5.3 V-Conen vahvuudet.....	25
5.4 V-Conen tarvittavat kehitysalueet .....	26
<b>6 Painehäviöt</b>	<b>28</b>
6.1 Kitkahäviöt .....	28
6.2 Kertahäviöt .....	28
<b>7 Paine-eron mittaaminen</b>	<b>30</b>
7.1 Paineenmittauspisteet kuristuslaipalle.....	30
7.2 Paine-erolähetin.....	32
<b>8 Soveltuvuus erilaisille virtauksille</b>	<b>34</b>
8.1 Suoran putkiosan vaatimukset.....	34
8.2 Lämpötilan vaikutus putkivirtauksessa .....	35
8.3 Paineen asettamat vaatimukset .....	36
8.4 Lian kerääntyminen .....	36
8.5 Muut huomiot paine-eroon perustuvassa mittauksessa .....	37
<b>9 Yhteenveto ja johtopäätökset</b>	<b>38</b>
<b>Lähdeluettelo</b>	<b>39</b>

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

### Roomalaiset aakkoset

<i>A</i>	putken poikkipinta-ala	$m^2$
<i>C<sub>d</sub></i>	purkauskerroin	-
<i>D</i>	putken sisähalkaisija	m
<i>d</i>	kurkun halkaisija	m
<i>E</i>	lähestymisnopeustekijä	-
<i>F<sub>a</sub></i>	materiaalin laajenemiskerroin	-
<i>g</i>	putoamiskiihtyvyyys	$m/s^2$
<i>h</i>	etäisyys	m
<i>K</i>	kertavastus	-
<i>k</i>	isentropivakio	-
<i>Or</i>	kostean virtauksen lukeminen	-
<i>p, P</i>	paine	Pa, bar
<i>q<sub>m</sub></i>	massavirta	kg/s
<i>q<sub>v</sub></i>	tilavuusvirta	$m^3/s$
<i>r</i>	etäisyys	m
<i>S</i>	lian aiheuttama virhe	-
<i>U<sub>1</sub></i>	yksikkömuunnoskerroin	mbar/bar
<i>U<sub>2</sub></i>	yksikkömuunnoskerroin	$mm^2/m^2$
<i>U<sub>3</sub></i>	yksikkömuunnoskerroin	$kg/m \cdot s^2 mbar$
<i>v<sub>1</sub></i>	virtausvakio	$\sqrt{\frac{kg \cdot m^3}{s^2 \cdot mbar}}$
<i>w</i>	virtausnopeus	m/s
<i>Y</i>	kaasun laajenemiskerroin	-
<i>z</i>	korkeus	m

**Kreikkalaiset aakkoset**

$\alpha$	lämpölaajenemiskerroin	1/K
$\beta$	kurkun ja sisähalkaisijan suhde	-
$\Delta$	ero	-
$\varepsilon$	laajenemiskerroin	-
$\mu$	dynaaminen viskositeetti	Ns/m <sup>2</sup>
$\rho$	tiheys	kg/m <sup>3</sup>

**Dimensiottomat luvut**

$Fr$	Frouden luku
$Re$	Reynoldsin luku

**Alaindeksit**

1	ennen mittaria
2	mittarin jälkeen
c	likakerros
cone	V-Cone
d	ero (difference)
g	kaasu (gas)
l	neste (liquid)
pipe	putki

## 1 JOHDANTO

Tilavuusvirran mittaus on yksi energiatekniikan yleisimpiä mittauksia. Teollisuudessa virtauksen tarkkaa määritystä tarvitaan tuotannon ohjauksessa ja prosessien vakauden säilyttämisessä ja seuraamisessa. Esimerkiksi prosessiteollisuudessa virtausmittaus on käytännössä ainoa suora tapa seurata tuotantoa.

Vaikka eri teorioihin perustuvia tekniikoita on kehitetty useita, on paine-eroon perustuvat mittarit pysyneet avainasemassa teollisuudessa. Paine-eroon perustuvien virtausmittareiden osuus kaikista teollisuuden virtausmittareista on arveltu olevan tällä hetkellä noin 40 %, yleisimpänä mittalaippa eli kuristuslaippa. Paine-eroon perustuvien tekniikoiden laajan käytön vuoksi pienikin epävarmuus virtausmittauksessa voi merkitä suuria summia yritykselle. Vaikka paine-eroon perustuvien virtausmittareiden aikakauden on ajateltu loppuvan jo pitkän aikaa, niiden markkinat ovat säilyneet aktiivisina. (Reader-Harris 2015, 22)

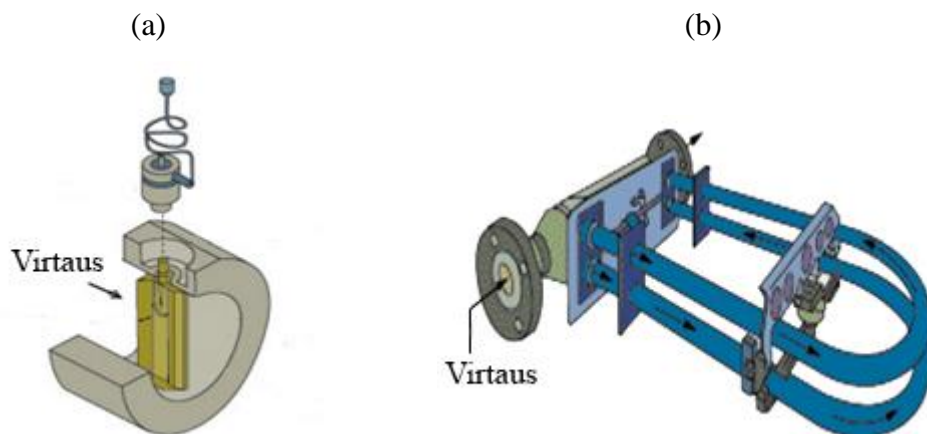
Paine-eroon perustuvia mittareita on useita ja kaikilla mittareilla on ollut omat myyntivalttinsa ja teollisuuden alansa. Käyttökohteen perusteella teollisuuden eri alat ovat valinneet ajan saatossa sillä hetkellä ominaisuuksiltaan parhaan mittarin omaan käyttökohteeseensa. Tämän vuoksi paine-eroon perustuvien mittareiden eri ominaisuuksia on vertailtu runsaasti ajan saatossa, mutta yhtä kaiken kattavaa mittaria ei ole nimetty.

Tässä kandidaatintyössä keskitytään paine-eroon perustuviin virtausmittariin ja erityisesti niiden vahvuuksiin sekä kehitysalueisiin. Tärkeimpänä mittarina työssä esitellään V-Cone-virtausmittari, jonka käyttö yleistyy tulevaisuudessa. V-Cone on yhdysvaltalaisen virtausmittaustekniikkaan erikoistuneen McCrometerin kaupallinen mittari, joka lupaa erittäin korkeaa tarkkuutta ja toistettavuutta muihin paine-eroon perustuviin virtausmittareihin verrattuna. Työn alussa selitetään paine-eroon perustuvan virtausmittauksen teoria, josta siirrytään yleisimpien paine-eroon perustuvien mittareiden ominaisuuksien esittelyyn sekä paine-eron mittaukseen. Tämän jälkeen kerrotaan eri mittareiden ominaisuuksista sekä mittarin valintaan vaikuttavia tekijöistä. Lopuksi pyritään antamaan ohjeita, mikäli mittarin valinnassa halutaan optimoida tiettyjä ominaisuuksia.

## 2 VIRTAUSMITTAUS YLEISESTI

Virtausmittauksen suorittamiseen on useita eri mittareita. Kun puhutaan virtausmittauksesta teollisuudessa tarkoitetaan usein erityisesti virtauksen selvittämistä putkessa. Mittauksessa voidaan selvittää nopeutta, jolloin tilavuusvirran laskentaan tarvitaan kanavan poikkipinta-ala sekä virtausprofiili. Tilavuusvirran seuraaminen on tärkeää, sillä se voi antaa tietoa putkeen kertyneestä liasta, vuodoista tai muista mahdollisista vioista. Virtausnopeus on yksi tärkeimmistä parametreista prosessin oikeatoimisuuden, turvallisuuden ja stabiiliuden kannalta.

Virtausnopeuden mittaus voi perustua fluidin virtauksen aiheuttamaan voimaan, lämpötilaeroon, mittarin lähettämän lasersäteen taajuudenmuutokseen, ultraäänen käyttöön dopplerin ilmiön avulla, fluidin sähköjohtavuuteen tai virtauksen aiheuttaman paineeroon. Uudempiä mittaustekniikoita ovat Vortex- ja Coriolis-mittarit kuvassa 1. Vortexmittarin toiminta perustuu esteen aiheuttamaan pyörteiden synnyttämiseen, joiden syntymistaajuus on riippuvainen virtausnopeudesta. (Emco Flow Systems 2007, 2) Coriolis-mittarin avulla massavirta määritetään värähtelyn aiheuttaman vaihe-eron avulla. Tässä työssä keskitytään kuitenkin erityisesti paine-eroon perustuviin virtausmittareihin. Yksinkertaisin tapa massavirran määrittämiseen on seurata säiliön tilavuudesta poistuvaa tilavuusvirtaa ajan funktiona, kun tilavuuteen ei ole muita virtoja. Saadun tilavuusvirran avulla voidaan putken dimensoiden avulla saada virtausnopeus. Tällainen tilavuusvirran määrittäminen ei kuitenkaan ole suuressa mittaluokassa käytännöllistä tai usein edes mahdollista, eikä se anna tietoa virtauksesta eri vaiheissa säiliöstä lähdön jälkeen.



**Kuva 1.** (a) Vortex-virtausmittarin periaatekuva. (Omega Engineering Inc, 2015 b) (b) Coriolis-virtausmittarin periaatekuva (Omega Engineering Inc, 2015 a)

Vaihtelevien käyttökohteiden vuoksi tilavuusvirran määrittämiseen on kehitetty erilaisia mittalaitteita, joiden toimintaperiaatteet ovat erilaisia. Kaikki virtausmittarit eivät sovelly virtausnopeuden mittaukseen putkessa. Yhtä parasta mittaustekniikkaa ei vielä ole kukaan pystynyt kehittämään, vaan optimaalinen ratkaisu riippuu useista tekijöistä. Valinnan perusteena ovat usein fluidin olomuoto, virtauksen likaisuus tai paine-alue, joka mittalaitteen täytyy kestää. Myös fluidin muut ominaisuudet vaikuttavat, kun halutaan saavuttaa paras mahdollinen lopputulos. Valinnassa täytyy ottaa huomioon lämpötila prosessin eri vaiheissa. Toisaalta aineen epäoptimaalinen happamuus tai emäksisyys voi lyhentää putkeen asennettavan osan käyttöikää huomattavasti. Tällöin täytyy valita suojakalvolla varustettu putkeen asennettava osa tai mittari, jota ei sijoiteta suoraan virtaukseen.

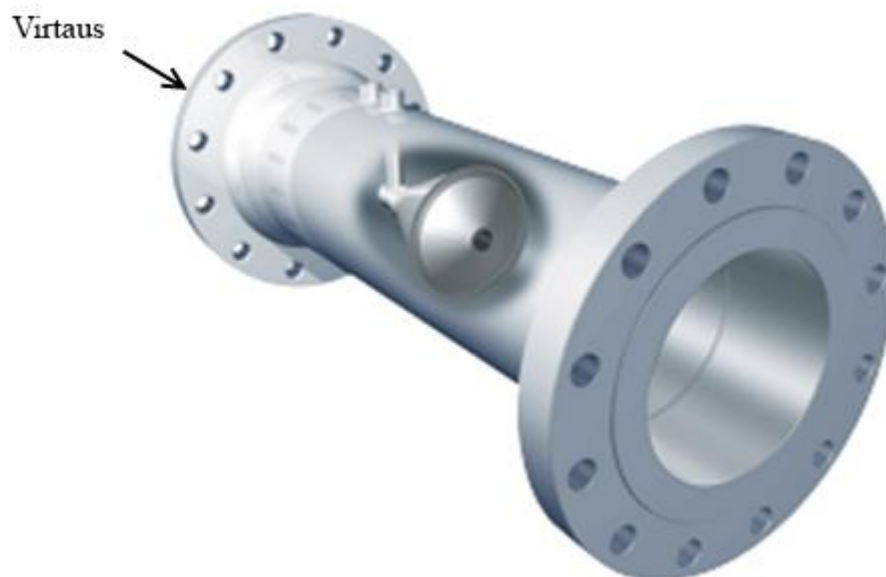
Myös aineen sähkönjohtavuus voi vaikuttaa mittarin valintaan, sillä esimerkiksi ilmapinnan mittauksessa ei voida käyttää magnetismin perustuvaa mittaria. Magneettisen virtausmittarin toiminta perustuu Faradayn lakiin, jonka mukaan sähköä johtavan fluidin virtausnopeus määräytyy virtauksen indusoiman jännitteen, magneettikentän voimakkuuden sekä magneettikentän pituuden perusteella. Voimalaitoksilla voidaan prosessissa joutua vaikuttamaan fluidin sähkönjohtavuuteen, jotta virtausmittaus voidaan suorittaa magneettista virtausmittaria käyttämällä.

Myös mittalaitteen tarkkuus voi olla yksi ratkaisevista tekijöistä, sillä teollisuuden prosesseissa ei yleensä vaadita suuria tarkkuuksia ja edullisemmalla virtausmittarilla voidaan tavoitella säästöjä. Toisaalta teollisuuden prosesseissa aineen ominaisuudet voivat vaihdella eri vaiheissa, joten yhden mittalaitetyypin valinta koko prosessin eri vaiheisiin ei ole aina järkevää tai edes mahdollista. Tällöin saatetaan tyytyä edullisempaan ja yksikertaisempaan mittalaitteeseen. Epätarkat mittarit voivat kuitenkin aiheuttaa merkittäviä kustannuksia laitokselle, mikäli mittaria käytetään määrittämään esimerkiksi arvokkaan fluidin kulutusta tai myytävän fluidin määrää. Tutkimuskäyttöön tarkoitetut mittarit voivat puolestaan olla herkkiä ulkopuolisille häiriöille, vaatia tarkkaa kalibrointia ja niiden kustannukset voivat nousta korkeiksi, mutta niiden antamat tulokset ovat yleensä paljon tarkempia.

Uusien innovatiivisten mittareiden myötä, kuten verrattain uusi V-Cone kuvassa 2, iäkäämpien mittareiden puutteita pystytään korvaamaan. Standardoinnilla uusista mittaus-



tavoista pystytään luomaan toistettava prosessi, jossa mittausympäristön muutos ei vaikuta merkittävästi mittaustarkkuuteen. Erityisesti paine-eroon perustuvien mittareiden ongelmia ovat olleet mittausalueen ja virtausprofiilin vaihteluun sekä painehäviöön liittyvät ongelmat. Sovelluskohteiden monimuotoisuus ja erilaisten fluidien ominaisuuksien aiheuttama virhe ovat vaikeuttaneet yhtenäisten standardien luomista, ja hidastaneet erilaisissa kohteissa virtausmittareiden käyttöönottoa. Lisäksi putkeen sijoitettavissa mittareissa on aina osia, jotka kuluvat joutuessaan tekemisiin virtauksen kanssa ja niiden käyttöikä riippuukin voimakkaasti putkessa virtaavan fluidin ominaisuuksista. Mittarin kuluessa virtauksen vaikutuksesta mittarialueen virtausominaisuudet voivat muuttua ja mittaustarkkuus laskea.



**Kuva 2.** Putkeen asennettava V-Cone-virtausmittari (McCrometer 2012, 1)

Vaikka työ painottuu V-Cone-virtausmittariin ja sen ominaisuuksiin, on tärkeää hahmottaa myös muut tällä hetkellä yleisesti käytössä olevat virtausmittarit sekä niiden vahvuudet ja ominaisuudet. Loppujen lopuksi uudet paine-eroon perustuvat virtausmittarit ovat kilpailuasemassa juuri samaan teoriaan pohjautuvien mittarien kanssa, joten niiden on tarjottava yleisten ominaisuuksien lisäksi jokin kilpailuvaltti, jotta ne voisivat yleistyä.

### 3 PAINE-EROON PERUSTUVIEN VIRTAUSMITTAREIDEN TEORIA

Kaikki paine-eroon perustuva virtausmittaus perustuu Bernoullin lausekkeeseen. Bernoullin lausekkeella voidaan määrittää fluidin virtauksen energiamäärä putkessa. Bernoullin lauseke yleisessä muodossa on yhtälössä 1. Yhtälö joudutaan usein kuitenkin esittämään häviöllisen Bernoullin lausekkeen muodossa, jolloin siihen lisätään painehäviötermi  $\Delta p_{\text{loss}}$ , koska virtausmittarin aiheuttama virtausprofiilin muutos aiheuttaa häviöitä. Painehäviöön palataan tarkemmin kappaleessa 7.

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho w_1^2 + \rho g z_1 = p_2 + \frac{1}{2}\rho w_2^2 + \rho g z_2 \quad (1)$$

jossa	$p_1$	paine ennen mittaria	[Pa]
	$\rho$	virtaavan fluidin tiheys	[kg/m <sup>3</sup> ]
	$w_1$	virtausnopeus ennen mittaria	[m/s]
	$g$	vallitseva putoamiskiihtyvyys	[m/s <sup>2</sup> ]
	$z_1$	korkeusasema ennen mittaria	[m]
	$p_2$	paine mittarin jälkeen	[Pa]
	$w_2$	virtausnopeus mittarin jälkeen	[m/s]
	$z_2$	korkeusasema mittarin jälkeen	[m]

Olettamalla korkeusasema vakioksi ( $z_1 = z_2$ ) voidaan supistaa potentiaalienergian termi pois. Yhtälö saa muodon 2.

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho w_1^2 = p_2 + \frac{1}{2}\rho w_2^2 \quad (2)$$

Nyt järjestelemällä termit nähdään, että paine-eron muutos on suoraan verrannollinen nopeuden muutoksen neliöön yhtälön 3 mukaisesti.

$$p_2 - p_1 = \frac{1}{2}\rho(w_2^2 - w_1^2) \quad (3)$$

Eli sijoittamalla paine-eron ja nopeuden muutokselle  $\Delta p$  ja  $\Delta w$  saadaan muodoksi

$$\Delta p = \frac{1}{2}\rho\Delta w^2 \quad (4)$$

Tästä nähdään, että virtausnopeus on riippuvainen paine-eronmuutoksen neliöjuuresta, esimerkiksi virtausnopeuden puolittuessa paine-ero tippuu neljäsosaan. Tämä voi aiheuttaa ongelmia tarkkuuteen ja luettavuuteen. Jatkuvuusyhtälön eli yhtälön 5 mukaan massavirta pysyy vakiona, vaikka kanavan poikkipinta-ala muuttuu. Tällöin virtausnopeus kasvaa. Tiedetään, että massavirta  $q_m$  on tiheyden  $\rho$ , pinta-alan  $A$  ja virtausnopeuden  $w$  funktio yhtälön 6 mukaisesti.

$$q_{m1} = q_{m2} \quad (5)$$

$$\rho_1 A_1 w_1 = \rho_2 A_2 w_2 \quad (6)$$

Mikäli tiheys pysyy vakiona, eli fluidi on kokoonpuristumaton, saa yhtälö muodon 7.

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{w_2}{w_1} \quad (7)$$

Nähdään, että virtausnopeuden muutos on kääntäen verrannollinen poikki-pinta-alan muutokseen ja halkaisijan  $d$  neliöön. Supistetaan vielä vakio-termit pois muotoon 8.

$$\frac{d_1^2}{d_2^2} = \frac{w_2}{w_1} \quad (8)$$

Kuristuslaipan ja venturiputken halkaisijasuhde määritetään yhtälöllä 9. Virtausnopeuksien suhde riippuu siis halkaisijasuhteesta.

$$\beta = \frac{d}{D} \quad (9)$$

jossa  $d$  kurkun halkaisija

$D$  putken sisähalkaisija

Sijoittamalla halkaisijasuhde yhtälöön 8 saadaan käyttömuotoinen yhtälö 10.

$$w_2 = \beta^2 w_1 \quad (10)$$

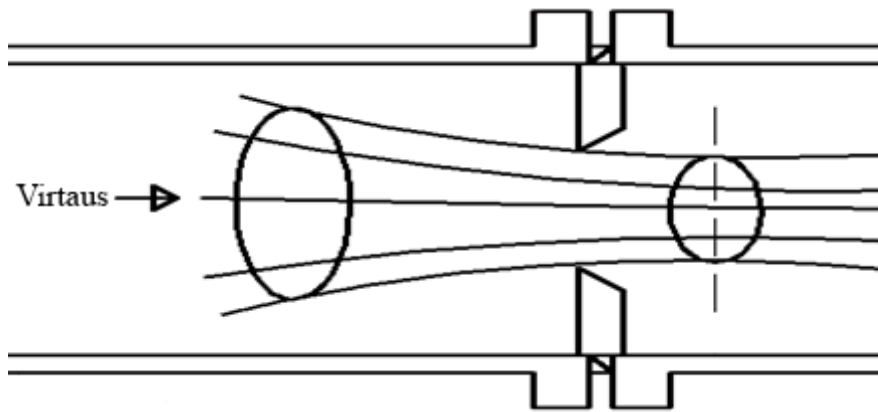
Lopullinen käyttömuoto vaatii lisämuokkausta sekä purkauskertoimen huomioimisen. Tätä muotoa 11 käytetään yleisesti kuristuslaipalle, venturiputkelle ja suuttimille. Hie-  
man muunneltu muoto on käytössä V-Conelle ja Wafer-Conelle.

$$q_v = C_d A_2 \sqrt{\frac{1}{1-\beta^4}} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (11)$$

Massavirta voidaan tarvittaessa määrittää yksinkertaisesti kertomalla yhtälö tiheydellä.

## 4 PAINE-EROON PERUSTUVAT MITTARIT YLEISESTI

Kuristuslaippa eli mittalaippa on yleisin paine-eroon perustuva virtausnopeusmittari. Kuristuslaipan toiminta perustuu virtauksen kuristamiseen eli ohjaamiseen kanavan poikkileikkausta pienemmän aukon läpi kuvan 3 mukaisesti. Tämä aiheuttaa paineen nousun ennen aukkoa. Ohitettuaan reiän, virtauksen nopeus kasvaa ja paine pienenee. Laippa aiheuttaa kuitenkin verrattain suuren painehäviön, ja sen mitta-alue ilman paine-erolähetintä on varsin pieni, 3:1, kun sallitaan  $\pm 1$  %:n virhe. (Liptak 2003, 259) Kuristuslaippaa käsitellään tarkemmin kappaleessa 5.1.



**Kuva 3.** Kuristuslaipan toiminta putkivirtauksessa

Venturiputki on putkeen asennettava suppeneva-laajeneva kartio-osuus, jonka avulla voidaan määrittää virtausnopeus. Sen toiminta perustuu virtausnopeuden kiihtymiseen suppenevan osan aikana. Kartioiden välissä on kurkku, josta alentunut paine mitataan. Venturiputki pystyy näillä suppenevalla ja laajenevalla osalla vaikuttamaan virtausnopeuteen ilman suurta paine-eron aiheutusta ja sen paine-eron palautuminen on korkeampi kuin kuristuslaipalla. Venturiputken palataan kappaleessa 5.2.

Suuttimien sovelluskohteet ovat pienemmän halkaisijan putkissa, kuin kahden edellisen sovelluksen. Suuttimen paine-ero mitataan standardin mukaisista paikoista, jolloin sen virhe on 1-3 %. Sen painehäviö on kuitenkin pienempi kuin laipan sen muotoilun ansiosta. Suuttimen toimintaa arvioidaan kappaleessa 5.4.

### 4.1 Paine-eroon perustuvat virtausmittarit

Kuten jo johdannossa mainittiin, paine-eroon perustuva virtausmittaus on edelleen erittäin suosittu teollisuudessa. Paine-eroon perustuvien mittareiden suurimpina etuina ovat edullisuus, yksinkertainen rakenne ja luotettavuus. Ne ovat oikein asennettuina ja käy-

tettyinä pitkäikäisiä ja tarkkoja. Lisäksi teoria paine-eron ja virtausnopeuden suhteesta on vanha ja sitä on tutkittu paljon. Paine-eroon perustuvista ratkaisuista vanhimpia ovat venturiputki ja kuristuslaippa. Viime vuosisadan lopulta alkaen muuttuvan alueen mittarit, V-Cone sekä kiilamittarit (eng. wedge meters) ovat saaneet paljon kiinnostusta osakseen (Singh 2005, 291). Tässä kappaleessa esitellään tärkeimmät teollisuudessa käytettävät paine-eroon perustuvat virtausmittarit, eli kuristuslaippa, venturiputki ja suutin sekä tehdään lyhyt katsaus toiseen V-Conen kehittäjän, McCrometerin, virtausmittariin Wafer-Coneen.

## 4.2 Kuristuslaippa eli mittalaippa

Mittalaippa on käytännössä putkeen sijoitettava yleensä hiiliteräksestä tehty levy, jonka keskellä on symmetrisesti aukko tai useita aukkoja. Aukon terävä reuna sijoitetaan tulevan virtauksen suuntaan, jolloin virtaus kuristuu reiän läpi ja aiheuttaa paine-eron laipan yli, josta osa jää pysyväksi painehäviöksi. Mitoitus tehdään mielellään ISO-standardin 5167-2 mukaan, sillä oikein suunnitellun ja asennetun laipan mittausrvirhe on pieni,  $\pm 0,5-1$  %. (Reader-Harris 2015, 259) Tarkkuus riippuu kuitenkin aina virtausprofiilista mittauskohdassa, ja mittaustuloksista tulee osata analysoida suorien putkiosuuksien vaikutus saatuun tulokseen. Kuristuslaipalla ei pystytä vaikuttamaan virtausprofiiliin parantavasti. Muihin paine-eroon perustuviin tekniikoihin verrattuna kuristuslaipan vaatima suoran putkiosuuden tarve on suuri, koska kuristuslaippa ei itsessään pysty vaikuttamaan virtausprofiiliin.

Mittalaipan reiälle on myös useita vaihtoehtoisia ratkaisuja. Yleisin laippamalli on symmetrisesti putken keskellä oleva reikä, jonka läpi virtaus kulkee. Epäkeskeinen laippa (eng. eccentric orifice) on ratkaisu, jossa reiän keskipiste on sijoitettu pois putken keskipisteestä. Tällä voidaan parantaa heterogeenisen virtausmittauksen tarkkuutta. Esimerkiksi vesipisaroita sisältävä kaasuvirtaus jatkaa laipan ohi, eivätkä pitoisuudet kerry laipan alueelle. Lohkokuristuslaipassa (eng. segmental orificessa) reikä on katkaistu vaakasuunnassa ja se on sijoitettu ulkoreunan läheisyyteen, yleensä alareunaan. Tällöin fluidissa olevat partikkelit virtaavat paremmin reiän läpi häiritsemättä mittausta. Kaksi jälkimmäistä laipparatkaisua soveltuvat paremmin heterogeenisen virtauksen mittaamiseen, vaikka näiden ratkaisujen tarkkuus ei ole yhtä korkea kuin perinteisen laipan.

(Emerson 2010, 5) Teräväreunainen laippa, jossa reikä sijaitsee keskellä kuvassa 4, on ainoa standardin mukainen malli ja yleisimmin käytetty.



**Kuva 4.** Tavallisin kuristuslaipan putkeen sijoitettava osa, jossa reikä on symmetrisesti putken keskellä (SlurryFlo Valve Corp, 2014)

Kuristuslaipalle on teollisuudessa sekä standardissa SFS-EN ISO 5167:2003 massavirralle määritelty ja yleisesti käytetty yhtälö 12.

$$q_m = C_d E \varepsilon \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2\rho_1 \Delta p} \quad (12)$$

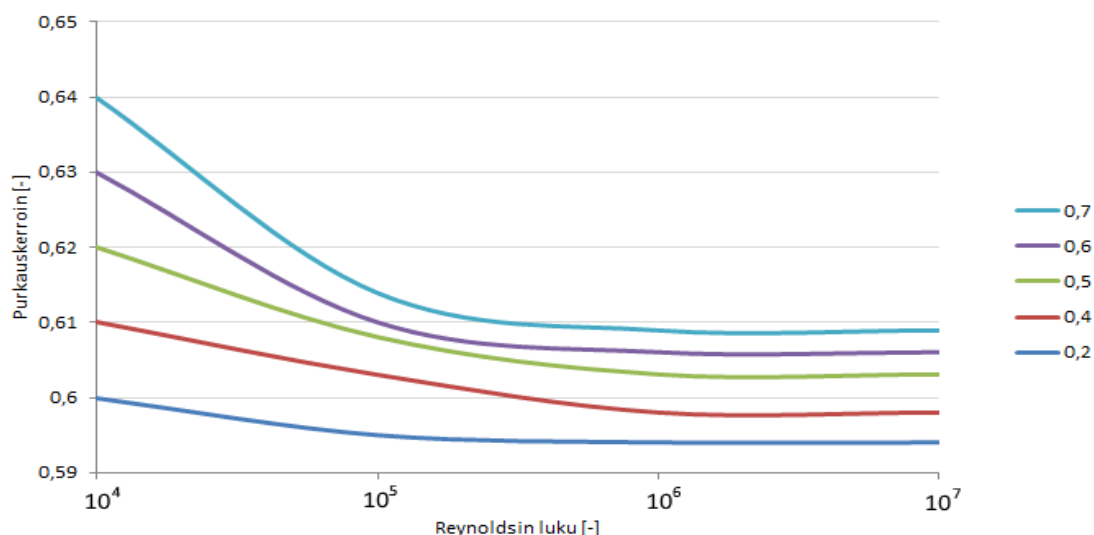
Jossa	$C_d$	purkauskerroin	[-]
	$E$	lähestymisnopeustekijä	[-]
	$\varepsilon$	laajenemiskerroin	[-]
	$d$	laipan reiän halkaisija	[m]
	$\rho_1$	fluidin tiheys sisääntulossa	[kg/m <sup>3</sup> ]
	$\Delta p$	paineen muutos laipan yli	[Pa]

Lähestymisnopeustekijä  $E$  riippuu halkaisijasuhdeesta yhtälön 13 mukaisesti.

$$E = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^4}} \quad (13)$$

jossa	$\beta$	halkaisijasuhde	[-]
-------	---------	-----------------	-----

Purkauskertoimen  $C_d$  arvo riippuu laipan reiästä, putken halkaisijasta, virtauksen Reynoldsin luvusta sekä paineenmittaustavasta. Teräväreunaisella laipalla purkauserroin pienenee Reynoldsin luvun kasvaessa kuvan 5 mukaisesti. Standardin mukaisen korrelaation avulla standardin mukaisille kuristuslaipoille purkauserroin pystytään laskemaan. (Reader-Harris 2015, 8)



**Kuva 5.** Kuristuslaipan purkauskertoimia Reynoldsin luvun kasvaessa eri halkaisijasuhteilla (EngineeringToolbox)

Laajenemiskertoimen  $\varepsilon$  arvo on kokoonpuristumattomille virtauksille yksi, mutta tiheyden muuttuessa kaasuilla joudutaan käyttämään standardin mukaista korrelaatiota. Paineroon perustuvat mittarit voidaan kalibroida nesteessä, ja laajenemiskertoimen avulla ne voidaan siirtää kaasuvirtauksen mittaukseen.

Laippa, jonka reiän tuloreuna on pyörästynyt, käyttäytyy virtauksessa eri tavoin kuin teräväreunainen laippa. Tällöin virtaus ei irtoa halutulla tavalla laipan reunoista ja aiheuttaa näin virhettä mittaukseen, kun purkauskertoimen määrittäminen vaikeutuu. Vena contracta -kohta on reiän jälkeen kohta, jossa paine saavuttaa minimiarvon ja virtausnopeus on suuremmillaan. Vena contracta -alueen kasvaessa purkauserroin kasvaa. Kuristuslaipan reunan pyörästymisen voi myös aiheuttaa eroosion tai kavitaation seurauksena tai huolimattomasta käsittelystä. Standardin mukainen teräväreunainen laippa antaa luotettavia tuloksia, ja on käytetty malli teollisuuden sovelluksissa. Mikäli reikä ei ole viistemallinen, vaan on lieriön muotoinen, on standardin mukaan laipan paksuuden tällöin oltava alle 2 % putken paksuudesta. (Reader-Harris 2015, 39)

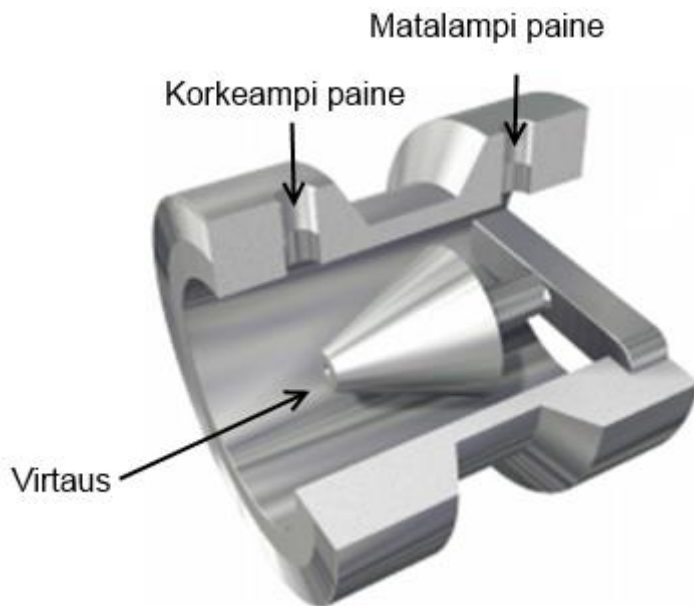
Mittalaipan Reynoldsin arvo on  $10^4$ - $10^8$ , mutta se riippuu halkaisijasuksesta ja putken halkaisijasta. Reiän laajenemiskulmalle ei ole havaittu olevan vaikutusta purkauskerrotimeen sen ollessa välillä  $30$ – $60$  °. Halkaisijasuksen tulee olla  $0,2:n$  ja  $0,6:n$  välillä luotettavien tulosten saamiseksi. Tulopuolen pinnankarheuden tulee olla standardin mukaan  $< 10^{-4}$  halkaisijasta ja suhteellisen pinnankarheuden tulee olla  $< 3 \cdot 10^{-4}$ . Nämä raja-arvot on kuitenkin helppo saavuttaa. Jättöpuolen pinnankarheudella ei ole havaittu olevan vaikutusta purkaukseroitteeseen, joka on ymmärrettävää virtauksen irrotessa laipan seinistä reiän jälkeen. (Reader-Harris 2015, 37)

Myös vaihtoehtoa, jossa useita reikiä on sijoitettu keskipisteen suhteen symmetrisesti kuristuslaippaan (eng. perforated orifice) on tutkittu jonkin verran. Tällöin saatu purkauskerroin on suurempi perinteiseen yhden reiän ratkaisuun nähden ja purkauskerroin vakiintuu jo pienemmillä Reynoldsin luvun arvoilla, joka on hyvä lähtökohta paineeroon perustuvilla mittareilla. Myös purkaukseroitteen vaihtelu oli varsin pieni ( $\pm 2,6$  %), kun häiriön aiheuttaja oli viiden halkaisijan päässä. Tekniikka vaatii kuitenkin lisätutkimusta. (Huang et al 2012, 82)

### 4.3 Wafer-Cone

Wafer-Cone on McCrometerin toinen kaupallinen mittauskomponentti, mutta se on tarkoitettu pienemmille putkille, kokoluokkaa  $1$ – $6$  tuumaa (noin  $12$ – $150$  mm). Wafer-Cone on rakenteeltaan yksinkertaisempi kuin V-Cone, mutta sen toimintaperiaate on sama, eli putkessa oleva kartio ohjaa virtauksen putken seinien lähellä. Wafer-Conen avulla tilavuus- ja massavirta lasketaan samoin kuin seuraavassa kappaleessa esiteltävän V-Conevirtausmittarin. Wafer-Conelle McCrometerin lupaama tarkkuus on hieman huonompi kuin V-Conen, mutta  $\pm 1$  %:n virhemarginaali olisi varsin tarkka paineeroon perustuvalle tekniikalle. McCrometer ilmoittaa suoran putkiosuuden tarpeeksi  $0$ – $3$  putkihalkaisijaa ennen mittaria, sekä  $0$ - $2$  halkaisijaa mittarin jälkeen. Wafer-Conen rakenne ei sisällä teräviä reunoja, joten kuluminen ei ole yhtä suuri ongelma kuin esimerkiksi laipoilla. Käytännössä Wafer-Cone on vain kiinteä kartio kuvan 6 mukaisesti, joka ei sisällä paineenmittausta, vaan paine mitataan putken seinältä ennen kartiota ja sen jälkeen. Mittari asennetaan kärki tulevan virtauksen suuntaan. Wafer-Cone vaatii myös paine-erolähtettimen paine-eron lukemiseen.



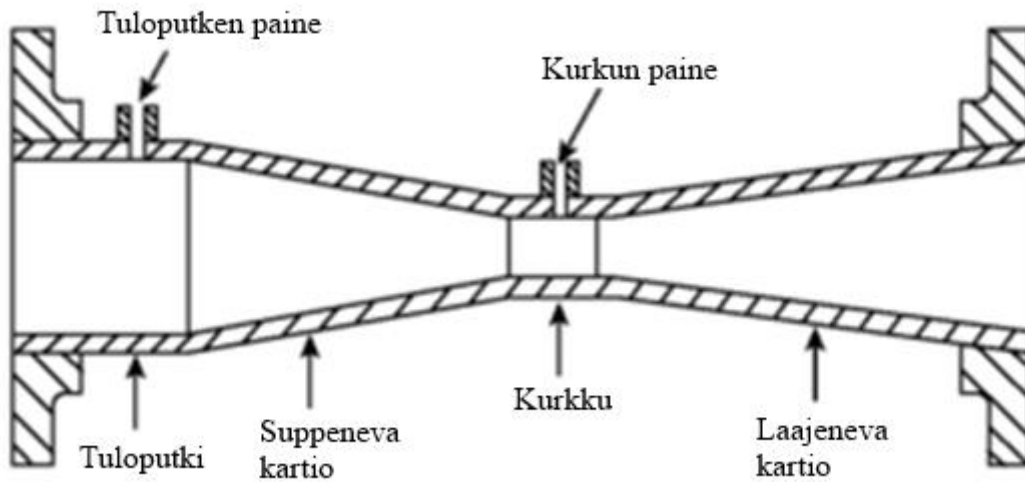


**Kuva 6.** Huomaa Waferconen paine-eron mittauspisteet kuvan ylä laidassa, ei kartion kärjessä. (McCrometer 2013)

Melko uutena virtausmittarina Wafer-Conesta ei ole kovin kattavaa informaatiota, mutta yksittäisiä tutkimuksia on tehty. Peters et al (2004) ovat tutkineet Waferconen tarkkuutta standardin ja ei-standardin mukaisissa mittausjärjestelyissä kahden ja neljän tuuman putkissa ilmalla ja vedellä. Halkaisijasuhteet olivat 0,45 ja 0,65 ja saadut tulokset olivat tarkkuudeltaan huonoimmillaan  $1,96 \pm 0,83\%$ . Tämä tarkkuus saatiin, kun välittömästi mittarin edessä oli puoliksi avoin sulkuventtiili (Peters et al 2006, 252). Tulokset antavat viitteitä varsin hyvästä tarkkuudesta. Lisätutkimuksia kuitenkin kaivataan luotettavuuden parantamiseksi.

#### 4.4 Venturiputki

Venturiputkella voidaan määrittää fluidin virtausnopeus putkessa paine-eron avulla. Fluidin painetta mitataan kahdesta virtauskohdasta. Mittauskohdista ensimmäinen sijoitetaan puolen putkihalkaisijan etäisyydelle ylävirtaan venturiputken sisääntulokartiosta. Toinen mittauspiste sijoitetaan kurkkuun noin puolen kurkun halkaisijan päähän supenevasta kartiosta kuvan 7 mukaisesti. Paine-ero syntyy fluidin nopeuden kiihtyessä kapeassa kurkussa Venturi-ilmiön mukaisesti.



**Kuva 7.** Venturiputken poikkileikkaus (mukaiillen Lipták 2003, 376)

Virtaussuunnasta katsottuna ensimmäinen paineenmittaus antaa arvon korkeammalle paineelle ja kurkussa oleva mittaus kertoo alemman paineen. Näiden erotuksena laskeetaan paine-ero, jota voidaan soveltaa halutulla tavalla virtausnopeuden laskentaan. Standardin mukaisen venturiputken saapumiskulma on 20-22 ° ja laajenemiskulma 7-15 °. Pienemmällä laajenemiskulmalla saavutetaan pienempi painehäviö, mutta samalla mittarin pituus kasvaa. Virtauksen määrittämiseen täytyy tietää purkauskerroin, kurkun ja putken halkaisijasuhde, fluidin tiheys sekä paine-ero. Venturiputken massavirralle pätee sama yhtälö 12 kuin kuristuslaipalle, jonka muuttujat on nimetty aiemmin.

$$q_m = CE\varepsilon \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2\rho_1 \Delta p} \quad (12)$$

Venturiputken purkauskertoimet ovat tyypillisesti suuruusluokkaa 0,98-1. Venturiputken vahvuuksia kuristuslaippaan verrattuna ovat pienempi painehäviö, vähäisempi lian kerääntyminen mittarin alueelle ja pienempi suoran putkiosuuden tarve ennen mittauspistettä. Luotettava toimialue venturiputkelle on Reynoldsin luvun arvoilla  $2 \cdot 10^5$ - $2 \cdot 10^6$  riippuen suppenevan osan valmistustavasta. Vaikka kuristuslaipan purkauskertoimen epävarmuus on yleensä pienempi kuin venturiputken, venturiputki on kuristuslaippaa kestävämpi. Venturiputken yleisimmät käyttökohteet ovat olleet merenalaisissa sovelluksissa, kostean kaasun sovelluksissa sekä monifaasisovelluksissa. ISO-standardin 5167-4 mukaisesti asennetun ja valmistetun venturiputken mittausvirhe on vähän yli  $\pm 1\%$ :n luokkaa. Suurin tarkkuutta heikentävä tekijä on virheellinen paineenmittauspis-

teiden muoto ja sijainti. Tämän virheen osuus kasvaa erityisesti suurilla nopeuksilla. (Reader-Harris 2015, 21)

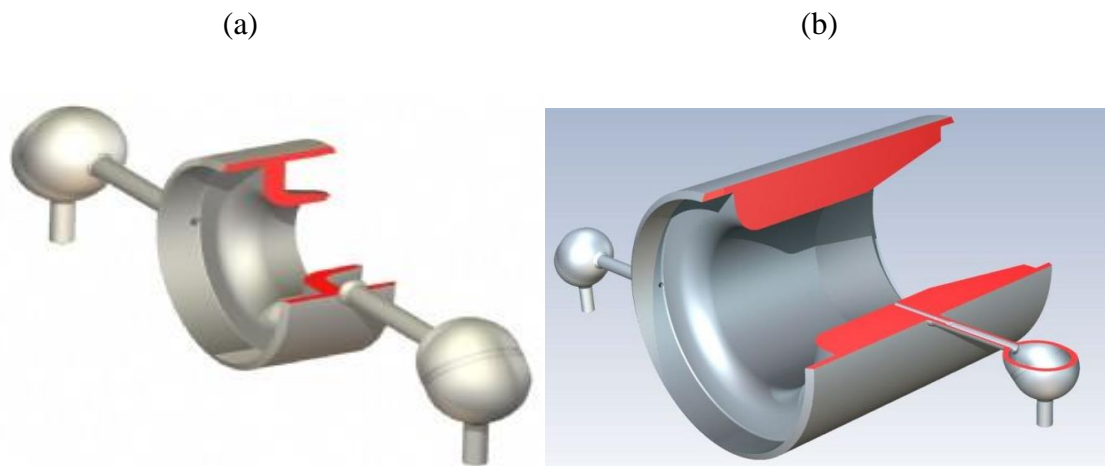
Mikäli kurkun staattinen paine laskee fluidin kyllästymispaineen alapuolelle, virtauksessa ilmenee kavitointia kurkun jälkeen. Tällöin venturiputken jälkeen virtauksessa on höyryä, joka kuristaa virtausta ja synnyttää tasaisen paineprofiilin ennen venturiputkea. Tätä kavitoivan venturiputken teoriaa on tutkinut Hojad Ghassemi ja Hamidreza Farshi Fasid vuonna 2011. Tutkimuksessaan he mittasivat 5 mm:n, 2,5 mm:n sekä 1 mm:n kurkun halkaisijoilla kavitoivan venturiputken toimintaa pienillä massavirroilla. Esimerkiksi kurkun halkaisijan ollessa 1 mm ja putken halkaisija 3 mm kavitoiva venturiputki loi mittauksessa tasaisen massavirran painesuhteen ollessa alle 0,8. Painesuhteen ylittäessä 0,8 venturiputki toimi kuten kavitoimaton venturiputki. Tätä teoriaa voidaan hyödyntää sovellettaessa venturiputken käyttöä alle 60 000 Reynoldin luvun arvoilla. (Ghassemi 2011, 411) On kuitenkin tärkeää huomata, että standardin mukaisen venturiputken pienin kurkun halkaisija on 50 mm.

Purkauskertoimen käyttäytymistä ei-standardin mukaisissa venturiputkissa on tutkinut myös M. J. Reader-Harris vuonna 2001. Tutkimuksessa tarkasteltiin 21 venturiputken toimintaa korkeapaineisessa kaasuvirtauksessa ja nestevirtauksessa. Venturiputkista 15 oli standardin mukaisia 21°:n suppenemiskulmalla ja kolme 31,5°:n sekä 10,5°:n suppenemiskulmalla valmistettuja. Tutkimuksessa saavutettiin nestevirtaukselle 0,74 prosentin epätarkkuus, mutta kaasuvirtauksessa epätarkkuus oli keskimäärin 1,23 prosenttia. Ei-standardin mukaisilla pienemmän suppenemiskulman putkilla saavutettiin 0,71 prosentin epävarmuus purkauskertoimelle. Tulokseen vaikuttaa ymmärrettävästi pienempi otos, koska pienemmän suppenemiskulman putkia oli vain kolme (Reader-Harris 2001, 144). Tällöin tuloksen luotettavuus ei ole yhtä korkea, vaikka saavutettu epätarkkuus olikin pienempi.

## 4.5 Suuttimet

Suuttimia käytetään muiden tässä kappaleessa esiteltyjen virtausmittareiden tavoin tilavuusvirran määrittämiseen putkistossa. Virtausmittauksessa käytetyt suuttimet jaetaan ISA 1932 –suuttimiin kuvassa 8a, pitkän säteen suuttimiin sekä venturisuuttimiin 8b, joilla jokaisella on oma standardin mukainen muotonsa sekä paineenmittauspaikkojen

sijoitus. Pitkän säteen suuttimet ovat kuin ISA 1932 –suuttimet, mutta niiden suppemisalue on pidempi.



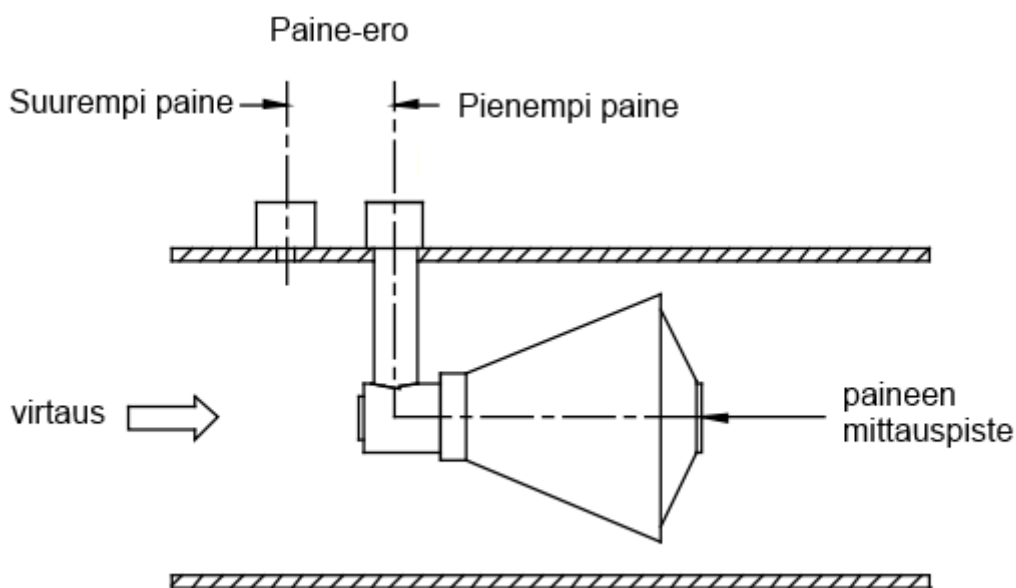
**Kuva 8.** (a) ISA 1932 -suutin ja (b) venturisuutin (Emco Flow Meters, 2013)

Ennen suutinta paineenmittaus sijoitetaan noin yhden halkaisijan päähän suuttimen alusta. Kun suuttimia käytetään tilavuusvirran mittauksessa, voidaan jälkimmäinen paineenmittaus sijoittaa putken seinälle, tai suoraan suuttimen kurkkuun. Seinään sijoitettaessa noudatetaan ISO-standardia 5167-3. Kurkkumittaukselle ohjeita antaa Yhdysvaltalainen ASME PTC 6 –standardi. Yleisimmin suuttimia käytetään sähköntuotantolaitoksien suorituskykytesteissä, ja niiden toiminta-alue on Reynoldsin luvun arvoilla  $2 \cdot 10^4$ - $10^7$ . Yleensä suuttimia suositellaan vasta kuin Reynoldsin luku ylittää 50 000. Venturisuuttimella toiminta-alue on pienempi,  $1,5 \cdot 10^5$ - $2 \cdot 10^6$ . Tilavuus- ja massavirrat saadaan samoilla yhtälöillä kuin kuristuslaipan ja venturiputkin tapauksissa. (Reader-Harris 2015, 286)

Suuttimien purkauskertoimet ovat lähellä arvoa yksi, mutta koska suutin ei pysty vaikuttamaan virtausprofiliin, sen tarvitsemat suorat putkiosuudet mittarin ympärillä ovat suuret, mielellään 10-30 halkaisijaa ennen suutinta. Yleensä suuttimia käytetään kuitenkin paljon pienemmissä putkilinjoissa kuin kuristuslaippoja. Lian kerääntyminen suuttimen alueelle ei ole suurta, mutta sen mitta-alue on 4:1 ilman paine-erolähetintä.

## 5 V-CONE

V-Cone on muiden paine-eroon perustuvien mittareiden tapaan putken sisälle asennettava osa, joka muuttaa paikallisesti virtausprofiilia. Putkeen sijoitettava osa on putken sisällä, virtauksen suuntaan käännetty laajeneva-suppeneva kartio, ja se voidaan liittää putkistoon hitsaus-, laippa tai kierrelitiitännällä. (Liptak 2003, 371) Kyseinen osa sisältää matala- ja korkeapainevirtauksen mittauspisteet. Virtauksen saapuessa kartio-osaan virtaus ohjautuu muista paine-eroon perustuvista mittareista poiketen putken seinien lähelle. Vapaassa putkivirtauksessa seinien lähellä virtausnopeus on pienempi kuin putken keskellä. V-Cone siis tasaa putken virtausprofiilia. Tällöin putkiston epätasaisuudet ja pyörteisyydet vähenevät. Virtaussuunnassa ensimmäinen paine mitataan ennen kartiomaista osaa yleensä noin viiden senttimetrin etäisyydeltä matalapaineen putkesta ylävirtaan. Toinen paineenmittaus eli pienempi paine mitataan kartion kärjestä laajeneva-suppeneva osan jälkeen. Paineenmittauskohdat on kuvattu paremmin kuvasta 9.



**Kuva 9.** V-Cone -mittarin mittauspisteet ja asettelu putkessa (mukaiillen McCrometer 2011, 1)

### 5.1 Rakenne ja kiinnittäminen

V-Cone on yleensä rakennettu ruostumattomasta teräksestä. Kevyemmissä järjestelmissä mittari voi kuitenkin sisältää myös PVC-muovia tai teflonpinnoitettua alumiinia. V-Cone on suunniteltu putkille, joiden halkaisijat ovat 12 millimetristä 1,8 metriin. (Liptak 2003, 371) Putkeen tuleva paineen mittaus sijoitetaan kuitenkin symmetrisesti putken

keskelle. Mittarin virtausalue on 10:1, joissain lähteissä jopa 30:1. Virtausalue tarkoittaa tilavuusvirran vaihtelua, jolla mittari toimii annettujen virhearvojen rajoissa. Kuvassa 10 V-Cone-virtausmittari on asennettu kierreltiännällä.



**Kuva 10.** V-Cone asennettuna laboratoriossa

V-Cone pyrkii tasamaan virtausprofiilia ennen matalamman paineen virtauspistettä muista paine-eroon perustuvista mittareista poiketen mittaamalla jälkimmäisen paineen putkiosan luomasta taskusta. Mittauspiste on myös virtauksen suuntainen toisin kuin muista tekniikoista poiketen. McCrometer tarjoaa V-Conea halkaisijasuhdeilla 0,45, 0,55, 0,65, 0,75 ja 0,8. V-Conen halkaisijasuhde määritellään yhtälön 14 mukaisesti. Jos yhtälöä tarkastellaan, voidaan huomata, että V-Conella halkaisijasuhde riippuu virtauskanavan pinta-alasta, eli halkaisijoiden neliöstä. V-Conen halkaisijasuhteen määrittelmä on siis erilainen kuin muilla paine-eroon perustuvilla virtausmittareilla fluidin erilaisen ohjauksen vuoksi.

$$\beta = \sqrt{\frac{D^2 - d^2}{D^2}} \quad (14)$$

## 5.2 Tilavuusvirran mittaaminen V-Conella

V-Conen paine-eron avulla tilavuusvirta saadaan McCrometerin V-Cone – asennusmanuaalista tässä yhtälön 15 avulla. McCrometer lupaa sivuillaan  $\pm 0,5$  %:n tarkkutta kalibroidulle mittarille, joka tarkoittaa käytännössä vain putkeen asennettavan osuutta eli mitatun purkaukertoimen vaihtelua. Koska yritys on kansainvälinen, on joissakin yhtälöissä yksikkömuunnoskertoimia.

$$q_v = F_a C_d Y v_1 \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} \quad (15)$$

jossa	$q_v$	tilavuusvirta	[m <sup>3</sup> /s]
	$F_a$	materiaalien laajenemiskerroin	[-]
	$C_d$	purkauskerroin	[-]
	$Y$	kaasun laajenemiskerroin	[-]
	$v_1$	virtausvakio	$\left[ \sqrt{\frac{\text{kg} \cdot \text{m}^3}{\text{s}^2 \cdot \text{mbar}}} \right]$
	$\Delta p$	mitattu paine-ero	[mbar]
	$\rho$	fluidin tiheys	[kg/m <sup>3</sup> ]

Massavirta saadaan suoraan, kun tiedetään tiheys, jolloin massavirran yhtälö 16 saa muodon

$$q_m = F_a C_d Y v_1 \sqrt{\rho \Delta p} \quad (16)$$

Putken ollessa samaa materiaalia V-Conen kanssa määritellään laajenemiskerroin yhtälöllä 17. Arvo  $F_a$  on hyvin pieni lämpötilan ollessa pieni, eikä sitä tarvitse ottaa huomioon alle 37,78 °C:n lämpötiloissa. (McCrometer 2011, 7)

$$F_a = 1 + 2\alpha T_d \quad (17)$$

jossa	$\alpha$	materiaalin lämpölaajenemiskerroin	[1/K]
	$T_d$	lämpötilaero referenssilämpötilaan	[K]

Mikäli V-Cone ja putki ovat eri materiaalista, voidaan laajenemiskerroin laskea yhtälöllä 18. (McCrometer 2011, 6)

$$F_a = \frac{D^2 - d^2}{[(1 - \alpha_{\text{pipe}} T_d) D]^2 - [(1 - \alpha_{\text{cone}} T_d) d]^2} \quad (18)$$

jossa	$\alpha_{\text{pipe}}$	putken lämpölaajenemiskerroin	[1/K]
	$\alpha_{\text{cone}}$	V-Conen lämpölaajenemiskerroin	[1/K]

Purkauskerroin  $C_d$  voidaan määrittää taulukoista, käyttää keskimääräistä purkauskerroimen arvoa tai se voidaan laskea sovitteen avulla, kun tiedetään Reynoldsin luku. Tyypillisesti purkauskerroimen arvo on V-Conelle hieman yli 0,7, eikä se riipu voimakkaasti halkaisijasuhteesta (Singh 2006, 295). Laajenemiskerroin on nesteille yksi, mutta kaasuilla se riippuu V-Conen halkaisijasuhteesta, paineesta, paine-erosta sekä kaasun koostumuksesta. V-Conen laajenemiskerroin kaasuille voidaan määrittää yhtälön 19 avulla. Yhtälössä on yksikkömuunnoskerroin, joka riippuu käytetystä järjestelmästä. SI-yksiköissä kertoimen suuruus on 0,001 bar/mbar. (McCrometer 2011, 5) Muunnoksen voi jättää pois, mikäli paine-ero ja toimintapaine sijoitetaan yhtälöön samassa yksikössä.

$$Y = 1 - (0,649 + 0,696\beta^4) \frac{U_1 \Delta p}{kP} \quad (19)$$

jossa	$U_1$	yksikkömuunnoskerroin	[bar/mbar]
	$k$	kaasun isentrooppivakio	[-]
	$\Delta p$	mitattu paine-ero	[mbar]
	$P$	absoluuttinen toimintapaine	[bar]

Lisäksi tarvitaan vielä virtausvakio, joka riippuu halkaisijasuhteesta sekä putken halkaisijasta. Virtausvakio voidaan määrittää yhtälön 20 avulla. Yhtälössä  $U_2$  ja  $U_3$  yksikkömuunnoksia, arvot SI-järjestelmässä  $U_2$ :lle  $10^6 \text{ mm}^2/\text{m}^2$  ja  $U_3$ :lle  $100 \text{ kg}/\text{ms}^2\text{mbar}$ . (McCrometer 2011, 6)

$$v_1 = \frac{\pi \cdot \sqrt{2U_3}}{4U_2} \cdot \frac{D^2 \cdot \beta^2}{\sqrt{1-\beta^4}} \quad (20)$$

jossa	$U_2$	yksikkömuunnos	[mm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ]
	$U_3$	yksikkömuunnos	[kg/m·s <sup>2</sup> mbar]

V-Conen paine-ero on riippuvainen keskimääräisestä virtausnopeudesta Bernoullin yhtälön mukaisesti, kuten muutkin paine-eroon perustuvat mittarit. Cone-tyyppisille virtausmittareille ei ole kuitenkaan vielä standardiyhtälöä, mutta tekniikka standardoi-



daan todennäköisesti standardiosassa ISO 5167-5 kasvaneen suosion vuoksi. ISO 5167 –sarja koostuu tällä hetkellä neljästä osasta, joissa määritellään yleisesti paine-eroon perustuvien virtausmittausten toteutustavat ja vaatimukset. (Reader-Harris 2015, 2)

### 5.3 V-Conen vahvuudet

V-Conen suurin etu muihin paine-eroon perustuviin mittareihin nähden on sen ominaisuus tasata virtausprofiilia. (Singh 2006, 292) Tämän vuoksi paineviesti on tasaisempi, ja paine-ero voidaan mitoittaa pienemmäksi ilman, että tarkkuus kärsii merkittävästi. Tasaaminen pienentää myös suoran putkiosuuden tarvetta mittausalueen ympärillä. Putkeen asennettavan mittarin suoran putkiosuuden tarve riippuu virtauksen pyörteisyydestä, mittaustavasta, mittarin halkaisijasuhteesta sekä Reynoldsin luvusta. Pienillä Reynoldsin luvuilla V-Cone saa etua muihin paine-eromenetelmiin verrattuna virtausprofiilin muuttuessa voimakkaasti putken seinämältä keskelle siirryttäessä eli laminaarisessa virtauksessa.

V-Conen suurimmat myyntivolyymit ovat kohdistuneet kaas- ja öljyputkistoissa tapahtuviin virtauskohteisiin. Tämän vuoksi sen ominaisuuksia kaksifaasisessa virtauksessa on tutkittu runsaasti. (He & Bai 2014, 77) V-Cone suoriutuu paremmin näissä likaisissa olosuhteissa kuin muut paine-eroon perustuvat virtausmittarit. Tämä tulee luultavasti olemaan kehitystrendi myös tulevaisuudessa tutkimustiedon lisääntyessä.

V-Conen on todettu tuottavan muita paine-eroon perustuvia mittareita parempia tuloksia mittaajärjestelyissä, joissa virtauksessa on ollut pyörteisyyttä. Pyörteisyyden sietoa ei viime vuosina ole ilmeisesti tutkittu, mutta sitä on tutkinut Shen et al vuonna 1995. Tutkimuksessaan he asensivat V-Conen 21 halkaisijan päähän siivistöstä, jolla tuotettiin pyörteisyyttä virtaukseen. Aina 40 °:een pyörteisyyteen asti V-Conen virhe pysyi alle  $\pm 0,5$  %:ssa keskiarvotuloksesta verrattaessa tulokseen ilman tuotettua pyörteisyyttä. (Shen et al, 1995) Toisaalta kun V-Conelle on ilmoitettu asennusmanuaalissa häiriintyneessä virtauksessa suoran putkiosuuden tarpeeksi 3 halkaisijaa, ei mittaus anna kovin hyödyllistä dataa, vaikkakin tutkimus tukee sen paremmuutta pyörteisessä virtauksessa muihin mittareihin nähden.

## 5.4 V-Conen tarvittavat kehitysalueet

V-Conen merkittävimmäksi ongelmaksi on noussut muiden paine-eroon perustuvien mittareiden tapaan sen taipumus ylittää kosteiden kaasujen tilavuusvirtaa. Tämä tulee huomioida esimerkiksi kostean kaasuvirtauksen tapauksessa, koska kosteus vaikuttaa virtausominaisuuksiin ja tiheyteen. Ylimittauksen lisäksi kosteuspitoisuuden kasvaminen hidastaa paine-eron palautumista takaisin alkuperäiseen arvoonsa. (Bai et al, 2014) Kostean kaasun sovelluskohteita on runsaasti voimalaitoksista kemianteekniikan laitoksiin. Ongelmaa on tutkittu paljon, ja tutkijat ovatkin tehneet korrelaatioita kostean kaasuvirtausmittauksen tarkkuuden parantamiseksi V-Conelle.

He & Bai (2014) ovat tutkineet kaksifaasisen fluidin mittauksessa käytettäviä korrelaatioita. Korrelaatiot ovat pääosin numeerisia, eikä kunnollista ja tarkkaa yhtälöä olla vielä pystytty kehittämään. He tiedostivat varhain, että kuivan kaasun tiheyden käyttäminen laskennassa aiheuttaa huomattavan virheen, kun kanavassa virtaava fluidi on nestettä ja kaasua. Toisaalta kosteus kaasuvirtauksessa vaikuttaa tiheyden lisäksi virtauksen käyttäytymiseen, huokoisuuteen sekä muihin parametreihin. *Or* (over reading) ilmoittaa ylilukemisen suuruuden. Yhtälö 21 antaa siis mitatun eli oletetun kaasun massavirran ja todellisen kaasun massavirran suhteen. (He & Bai 2014, 80)

$$Or = \frac{q_{m,g,olet}}{q_{m,tod}} \quad (21)$$

He & Bai määrittivät numeerisesti korrelaation 0,65:n ja 0,75:n halkaisijasuhteelle, jolloin molempien yhtälöissä otettiin suoraan huomioon niille ominaiset Lockhart-Martinellin parametri, Frouden luku sekä tiheyksien suhde. He onnistuvat esimerkiksi määrittämään numeerisen korrelaation 0,65:n halkaisijasuhteiselle V-Conelle, jonka epätarkkuus oli  $\pm 2,06$  %, joka luo toiveita mahdollisesti numeeristen menetelmien potentiaalista V-Conen kaksifaasitapausten ratkaisussa ja siten myös esimerkiksi sovelluksille, joissa mitataan kosteaa ilmaa. (He & Bai 2014, 84) Toisaalta mikäli kaikille eri halkaisijasuhteille joudutaan luomaan omat taulukot ja numeeriset korrelaatiot, vaatii se standardoinnissakin valtavaa koejärjestelyjen määrää luotettavien tulosten ja toistettavuuden takaamiseksi.

Standardoinnin puute aiheuttaa ongelmia V-Conen yleistymiselle. Cone-tyyppiset mittarit kaipaisivat standardeja nimenomaan optimaalisille kartioiden laajenemiskulmille ja mittareikien suuruuksille. Lisäksi tutkimukset purkauskertoimista ja paisuntakertoimista ovat vähissä, riittämättömiä eikä niitä ole taulukoitu saataville. (He & Bai 2014, 77-78) Tämä voi myös osin johtua McCrometerin yritysmäisestä otteesta kyseisen mittarityypin kaupallistamisessa, ja McCrometer myynnin ohella kalibroi laitteen asiakkaan tarpeen mukaisesti.

## 6 PAINEHÄVIÖT

Kuten jo aiemmin on tullut todettua, paine-eroon perustuvassa virtausmittauksessa tuloksen saanti perustuu mitattuun paine-eroon. Mittaustavasta (ts. mittarista) riippuen osa aiheutetusta paine-erosta palautuu virtauksessa mittauspisteen jälkeen, ja loppuosa jää pysyväksi painehäviöksi. Pysyvän painehäviön osuus lisää putkiston kokonaishäviöitä, joka voi aiheuttaa pumppaustarvetta. Pysyvän painehäviön osuus siis lisää prosessin energiankulutusta.

### 6.1 Kitkahäviöt

Paine-ero putkivirtauksessa koostuu kertavastuksista sekä kitkavastuksesta. Putkivirtauksen vastus riippuu eniten putken halkaisijasta. Darcy-Weisbachin yhtälöstä 22, johon on yhdistetty kertavastusten vaikutus, selviää, että keskimääräinen virtausnopeus  $w$  on kääntäen verrannollinen halkaisijan  $D$  neliöön. Putken halkaisijan kasvattaminen on tehokas tapa pienentää putkihäviöitä. (Larjola et al. 2013, 51) Sulkujen sisällä oleva ensimmäinen termi on putkiston osuus ja jälkimmäinen kertahäviöiden osuus. Kitkakerroin saadaan Moodyn käyrästä Reynoldsin luvun ja putken suhteellisen karheuden funktiona.

$$\Delta p_{\text{loss}} = \frac{1}{2} \rho w^2 \left( f \frac{L}{D} + \Sigma K \right) \quad (22)$$

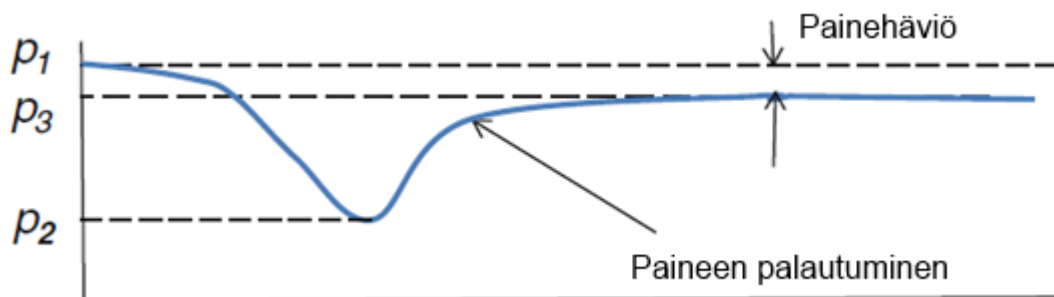
Jossa	$\Delta p_{\text{loss}}$	painehäviö putkistossa	[Pa]
	$w$	keskimääräinen virtausnopeus	[m/s]
	$L$	putken pituus	[m]
	$D$	putken halkaisija	[m]
	$f$	putken kitkakerroin	[-]
	$\Sigma K$	kertavastusten summa	[-]

### 6.2 Kertahäviöt

Eri kertavastuksille on määritetty tekijöitä, jolla ne aiheuttavat häviöitä eli virtauksen pumppaustarvetta. Kertavastukset ovat putkessa olevia sisääntuloja, mutkia ja venttiileitä, jotka aiheuttavat virtaukseen vastusta. Myös putkeen asennettavat virtausmittarit

aiheuttavat kertahäviöitä tai muuttavat paikallisesti virtauksen profiilia. Paine-eroon perustuvilla virtausmittareilla painehäviö riippuu myös halkaisijasuhteesta. Kuristuslaipalla pienempi halkaisijasuhte tarkoittaa suurempaa palautumatonta painehäviöitä. Kuristuslaippa on käytännössä yksi este virtaukselle, kun se pakotetaan virtaamaan putkea pienemmästä reiästä. Halkaisijasuhteen lähestyessä arvoa 0,8, on palautumaton painehäviö noin 40 % koko paine-erosta.

Venturiputken painehäviöt voidaan tulosuunnasta alkaen jakaa suppenevan kartion osuuteen (astettainen supistus) sekä laajenevan kartion osuuteen (asteittainen laajennus). (Ghassemi 2011, 407) Liian suuri suppenemiskulma aiheuttaa pyörteisyyttä virtaukseen. Liian suuri laajenemiskulma irroittaa nopeasti virtaavan fluidin putken seinästä ja aiheuttaa painehäviöitä. Liian pieni kulma aiheuttaa kartioiden tarpeetonta suurenemista ja lisää materiaalikustannuksia. Venturiputkilla halkaisijasuhteen vaikutus on pienempi kuin kuristuslaipalla ja palautumattoman painehäviön osuus on paljon pienempi, noin 10-20 %. Kuvassa 11 on näytetty käytännössä paineen palautuminen sen ohitettua venturiputken.



**Kuva 11.** Paineen käyttäytyminen venturiputkessa. Suurin osa paine-erosta palautuu, ja noin 20 % jää pysyväksi painehäviöksi. (Mukaiillen Reader-Harris 2015, 13)

## 7 PAINE-ERON MITTAAMINEN

Mittauspisteiden välillä syntynyt paine-ero voidaan lukea paine-erolähettimen avulla. Paine-eroviesti saadaan kytkemällä virtauksessa olevat paineenmittauspisteet impulssiinjiaan, joka yhdistää paineenmittauspisteet ja paine-erolähettimen kuvan 12 mukaisesti.



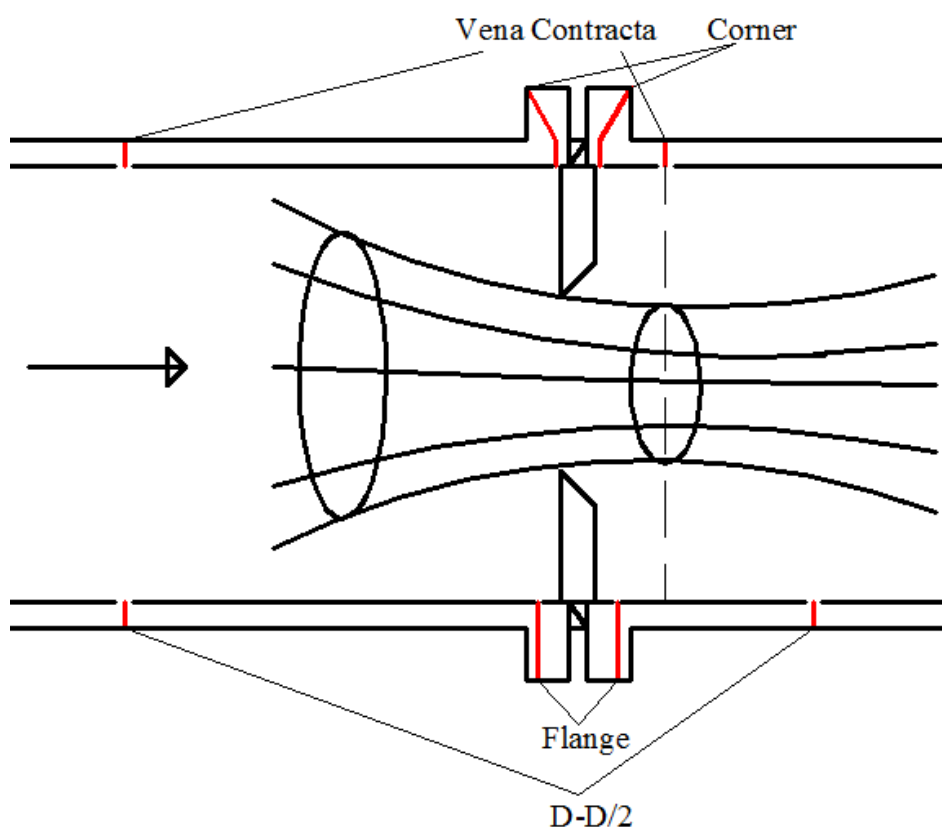
**Kuva 12.** Aplisensin APR2000-tyyppinen paine-erolähetin. Kuvan alaosasta tulevat impulssiinjat kytkeytyvät lähettimen prosessilaippoihin.

Impulssiinjat tulevat prosessilaippaan, jonka jälkeen paineanturi muuttaa mekaanisen paine-eron sähköiseksi viestiksi, yleensä virtaviestiksi väliltä 4...20 mA. Se voidaan lukea joko suoraan näytöllä varustetulta paine-erolähettimeltä tai erilliseltä lukupäätteeltä. Usein teollisuudessa ei ole tarvetta lukea manuaalisesti paine-eroviestejä, vaan paine-ero saadaan muiden suureiden tavoin kenttäväylällä yhdistettyä PLC:lle (programmable logic controller), jota voidaan seurata ja hallita tietokoneen välityksellä.

### 7.1 Paineenmittauspisteet kuristuslaipalle

Jokaiselle mittarityypille on ominainen paineenmittauspisteiden sijoituspaikka. Kuristuslaipalle mittaustapoja on tekniikan kehittyessä syntynyt useita. Yleensä kuristuslaip-

pa on asennettu laippaliitännällä, joten paineenmittauskohdat voidaan sijoittaa molemmin puolin tuuman etäisyydelle kuristuslaipasta (eng. flange tapping). Tällöin mittauspisteet ovat laipan alueella, jolloin paksuun laippaosaan on mahdollista suunnitella paineenmittauskohta. Toinen tapa mitata paine-ero ISO-standardin 5167 mukaisesti on D-D/2- tapa. Ensimmäinen paine mitataan halkaisijan etäisyydeltä laipan etureunasta ja matalamman paineen mittaus tulee olla puolen putken halkaisijan etäisyydellä laipan jälkeen. Ensimmäinen paineen mittauksen piste voi olla 0,5-2 halkaisijan etäisyydellä, eikä se tuota suurta virhettä mittaukseen. Lisäksi full-flow pipe tapping, jossa korkeampi paine mitataan 2,5 halkaisijan etäisyydeltä ennen laippaa ja matalampi kahdeksan halkaisijaa laipan jälkeen. Putkissa, joiden halkaisija on melko pieni, yleensä alle kaksi tuumaa, voidaan käyttää paineenmittausta välittömästi laipan molemmin puolin. Vena contracta –tapping on tapa, jossa korkeampi paine mitataan 0,5-2 halkaisijan etäisyydeltä ja matalampi paineen mittaus sijoitetaan vena contracta –kohtaan, joka riippuu halkaisijasuhteesta. (Intra Automation BSL 2011, 38) Paineenmittaustapa vaikuttaa tilavuusvirran laskennassa purkauskertoimen laskentaan. Mittauspisteiden sijoittamisesta saa käsityksen kuvasta 13.



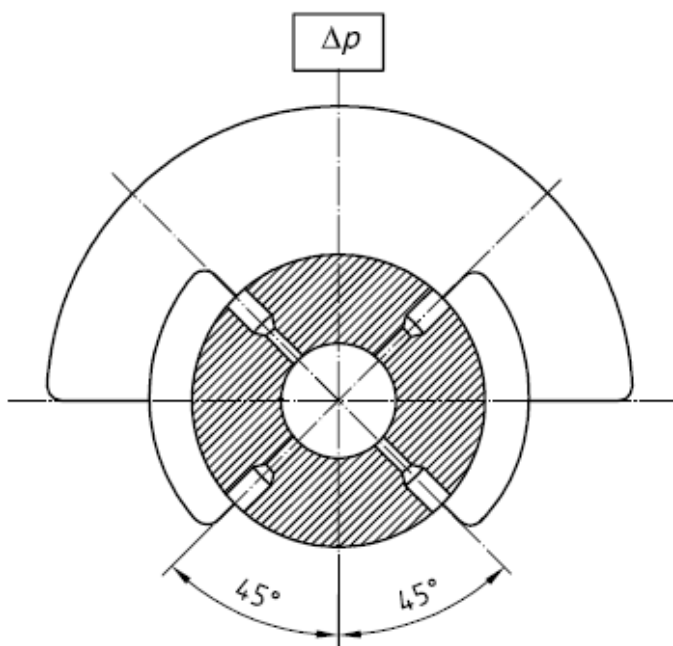
**Kuva 13.** Yleisimmät paineenmittaustavat kuristuslaipalle ja niiden sijoittaminen

## 7.2 Paine-erolähetin

Paine-erolähetin sijoitetaan mielellään mahdollisimman lähellä mittauspistettä ISO-standardin 2186 mukaisesti, jolloin voidaan välttyä suurilta korkeuseroilta, pitkiltä impulssilinjoilta ja ylimääräisiltä liitoksilta sekä mahdollisilta vuodoilta. (Reader-Harris 2015, 104) Mikäli linjassa voi ilmetä huomattavia voimia, esimerkiksi tärinää, voidaan käyttää joustavaa impulssilinjaa.

Lähetimet kannattaa kuitenkin sijoittaa paikkaan, jossa ne ovat mahdollisimman helposti kalibroitavissa ja jossa lämpötilavaihtelu on pieni. Korkeusero tulee ottaa huomioon paine-eroa määrittäessä, koska paine on tiheyden ja korkeuden funktio. Suoraa paine-erolähtetimen kytkentää putkilinjaan ei kuitenkaan suositella. Paine-erolähtetimen ja putkilinjan sekä impulssilinjojen välille on järkevää sijoittaa sulkuventtiilit, jotka mahdollistavat paine-erolähtetimen irroituksen ja korvauksen häiritsemättä prosessia. (Reader-Harris 2015, 105)

Paremmen lopputuloksen saamiseksi voidaan sijoittaa useampia paineenmittauspisteitä putken ympärille, jolloin saadun paine-eroviestin tarkkuus paranee (eng. triple-T) varsinkin epäsymmetrisen virtausprofiilin tapauksissa. (Reader-Harris 2015, 104) Kuvan 14 mukainen triple-T -kytkentä on vaihtoehto erityisesti venturiputkille.



**Kuva 14.** Standardin mukainen triple-T -kytkentä, jossa paineenmittaukset yhtyvät kolmessa haarassa (ISO 5167-1 2003, 9)



Yhden pisteen mittaus on kuitenkin varsin riittävä, eikä se ole suurin virhettä aiheuttava tekijä virtausmittauksessa. On kuitenkin tärkeää huomata, että paineenmittauspisteissä on paineyhteiden oltava kohtisuorassa putkivirtausta vastaan halutun tuloksen saamiseksi. Paineenmittausreikien koosta ja muodosta on määrätty ISO-standardissa 5167. Paine-erolähetin on usein kalliimpi komponentti kuin itse linjaan asennettava paine-eron aiheuttava osa. Paine-erolähettimen aiheuttama virhe on kokonaisvirheen kannalta hyvin pieni. Paine-ero voidaan myös lukea manuaalisesti ilman paine-erolähetintä esimerkiksi putkessa olevan vesipatsaan korkeuden avulla, mutta tällä tavalla paine-eron mittaus ei sovi suuren mittakaavan laitosasennuksiin, jossa prosesseja on useita, ja tietokonejärjestelmään on helppo asentaa sähköiset paine-erolähettimet.

Älykkäät paine-erolähettimet edistävät mittaustarkkuutta määrittämällä tilavuusvirran paine-eron lisäksi lämpötilan ja vallitsevan paineen syötteiden avulla. Tällöin paine-erolähetin voi määrittää tilavuusvirran muuttuvissa olosuhteissa kun fluidin ominaisuudet tunnetaan. Lähetin sisältää prosessorin, joka kasvattaa mittausaluetta, mahdollistaa mittausalueen muuttamisen ilman säätötarvetta sekä määrittää tilavuusvirran kompensoituissa olosuhteissa.

## 8 SOVELTUVUUS ERILAISILLE VIRTAUKSILLE

Eri mittarityypeille täytyy noudattaa valmistajan tai standardien vaatimuksia parhaan mahdollisen tarkkuuden saavuttamiseksi. Kaikki paine-eroon perustuvat mittaustavat edellyttävät, että putkivirtaus täyttää koko putken. Muutoin paine-eroviestin avulla ei pystytä suoraan määrittämään virtausnopeutta. Vajaan putkivirtauksen tapauksessa joudutaan soveltamaan muita mittaustapoja, esimerkiksi mittaria, joka mittaa vain pinnan korkeutta putkessa, jolloin virtausnopeus pystytään laskemaan muiden suureiden avulla.

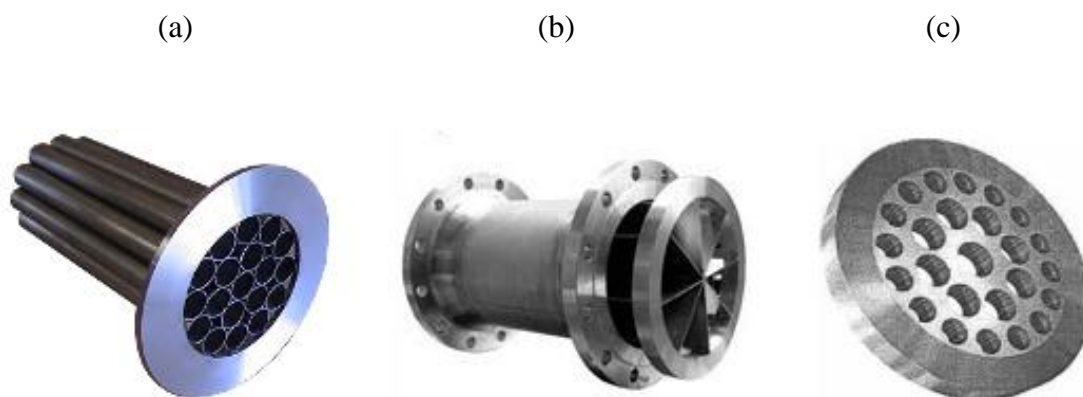
Paine-eroon perustuvissa tekniikoissa esimerkiksi kuristuslaipan pitkä suoran putkiosuuden vaatimus voi aiheuttaa ongelmia laitoksilla, joissa putkiston asettelu on kompakti. Huoltamistiheys vaihtelee mittarityypin, mittarin kulumisen ja virtausominaisuuksien mukaan, joten vaikeasti päästävä paikka virtausmittarille voi pidentää huolto-aikoja tai tarvetta purkaa muita linjan osia. Lian kertyminen mittarin alueelle voi aiheuttaa mittausvirhettä ja putkiston rasituksen kasvua. Lämpötila ja paine ovat myös suureita, jotka on tarpeen ottaa huomioon virtausmittarin ja sen materiaalin valinnassa.

### 8.1 Suoran putkiosan vaatimukset

McCrometer ilmoittaa V-Conelle vaadittavaksi suoraksi putkiosuudeksi 0-3 halkaisijaa ennen ja 0-2 halkaisijaa mittarin jälkeen riippuen virtauksen pyörteisyydestä, Reynoldsin luvusta, halkaisijasuhteesta sekä lähimmästä virtausta häiritsevästä tekijästä. Halkaisijasuhteen ollessa yli 0,7, lisätään aina yksi halkaisija, Reynoldsin luvun ollessa yli 200 000 lisätään osaan kertavastuksista yksi halkaisija sekä paljon häiritsevän kertavastuksen, esimerkiksi sulkuun tarkoitetun läppäventtiilin jälkeen tulee olla 2 halkaisijaa riippumatta Reynoldsin luvusta.

Kuristuslaipalle ja suuttimelle suositeltu suoran putkiosuuden pituus on aina yli kymmenen putkihalkaisijaa riippumatta esteestä. Erityisesti pyörteisyyden väheneminen suoran putkiosuuden aikana on hidasta, mikäli virtausmittari ei itse pysty vaikuttamaan virtausprofiiliin. Tämä voi aiheuttaa kuristuslaipan käytölle ylimääräisen putkivedon tarpeen, joka aiheuttaa kustannuksia. Venturiputken vaatima suora putkiosuus on yleensä huomattavasti pienempi kuin kuristuslaipan, mutta venturiputken oma pitkä rakenne vaatii myös monta putken halkaisijaa. Venturiputki vaatii 4-6 halkaisijaa ennen Venturiputken tyypistä riippuen. (Liptak 2003, 377)

Virtausprofiiliin voidaan pyrkiä vaikuttamaan putkeen asennettavien virtauksentasausverkoin tai –levyin, jotka tasaavat pyörteisyyttä. Tasaustekniikat jaetaan pyörteisyyden vähentäjiin ja virtausprofiilin tasaajiin. Pyörteisyyttä voidaan vähentää myös putkeen asennettavilla putkipakoilla, jotka tasaavat putkessa fluidin virtausta ennen mittapisteitä (Emerson, 2016). Putkipakat ja ratkaisut, joissa virtaus ohjataan kanaviin, ovat yleensä pyörteisyyden vähentäjiä, kun puolestaan levyt, joissa virtaus kulkee reikien läpi ovat virtausprofiilin tasaajia. Joitain yleisimpiä ratkaisuja on mainittu ISO-standardissa 5167-1 ja kuvassa 15. Myös virtauksessa esiintyvä pulssimaisuus vähenee tasaustekniikoita käyttämällä, jolloin suoran putkiosuuden tarve pienenee, ja mittauksen tarkkuus paranee sekä vaihtelu ajan suhteen pienenee.



**Kuva 15.** (a) Putkipakka (Groebner, 2016a) (b) Lohkosuoristin (HelloTrade) (c) Virtausprofiilin tasaukseen tarkoitettu laippa (Groebner, 2016b)

## 8.2 Lämpötilan vaikutus putkivirtauksessa

Lämpötila vaikuttaa putkimittauksessa kahdella tavalla. Lämpötila vaikuttaa fluidin olomuotoon ja ominaisuuksiin, sekä mittarin materiaalien laajenemisen kautta. Nesteillä lämpötilan kasvaessa viskositeetti pienenee. Kaasut käyttäytyvät päinvastoin eli viskositeetti pienenee lämpötilan pienentyessä. (Incropera et al 2015, 1003) Newtonilaisen fluidin viskositeetin kasvaessa nesteen putken seinälle aiheuttama leikkausjännitys pienenee. Leikkausjännityksen pienentyminen luo kanavaan tasaisemman virtausprofiilin. Toisaalta viskositeetin pienentyessä Reynoldsin luku kasvaa muiden suureiden pysyessä vakiona, jolloin putkivirtauksen ominaisuudet voivat muuttua. Lämpötilan noustessa materiaalien laajeneminen voi aiheuttaa ongelmia. Materiaalien laajentuessa putken

halkaisijasuhde muuttuu, joka aiheuttaa tarvetta arvioida virtausominaisuuksia sekä purkauskerrointa.

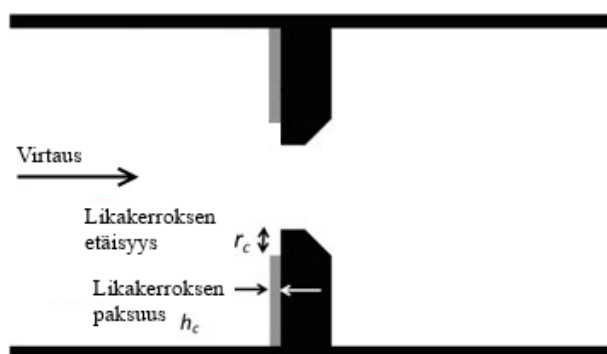
### 8.3 Paineen asettamat vaatimukset

Paine aiheuttaa harkinnan tarvetta laippamittauksessa laipan paksuudelle, sekä kaikissa paine-eromenetelmissä putkiston materiaaleille, paine-erolähtettimeille ja impulssilinjoille. Paineen kasvaessa nesteiden viskositeetti kasvaa, mutta kaasuilla paineen muutos ei vaikuta.

Oikein mitoitettun V-Conen tuottama paine-ero on pienempi kuin muiden paine-eroon perustuvien menetelmien. Sen luoma virtausprofiili on tasaisempi, ja näin ollen myös sen paine-eroviesti on ajan muuttuessa tasaisempi. Tällöin paine-ero usein mitoitetaan pienemmäksi, jolloin pysyvä painehäviö jää pienemmäksi. Pieni paine-eroviesti voi kuitenkin aiheuttaa merkittäviä ongelmia erityisesti mikäli mitattavassa linjassa vallitsee korkea paine. (Reader-Harris 2015, 123)

### 8.4 Lian kerääntyminen

Toisin kuin kuristuslaipassa, suuttimessa, V-Cone –virtausmittarissa tai venturiputkessa ei ole virtauksen pysäyttäviä taskuja, joihin lika voisi kerääntyä kuvan 16 mukaisesti. Virtauksen suunnassa putkiston jāvirtausmittarin alueelle kerääntyvä lika ajan kuluessa riippuu voimakkaasti virtaavan fluidin ominaisuuksista sekä mittarin materiaaleista. V-Conelle tutkimustietoa lian kerääntymisnopeudesta ei löydy, mutta koska se ei sisällä suuria virtausta kohtisuoraan olevia pintoja, voidaan se olettaa pieneksi.



**Kuva 16.** Likakerros laipan tulopuolen pinnalla (Reader-Harris 2015, 38)

Laipan kohtisuoraan virtausta vastaan olevilla pinnoilla vaikuttava tekijä on likaantuminen. Mikäli laipan reiän ympärille jää tulopuolelle liasta puhdas rengas, on sen vaikutus purkaukertoimeen mahdollista määrittää yhtälön 23 avulla 0,28 %:n epävarmuudella. Laipan likaantuessa aivan reiän reunaan saakka on virtauksen käyttäytymistä mahdotonta määrittää tarkasti, koska se rikkoo virtausprofiilin reiän läpi ja vaikuttaa merkittävästi purkaukertoimeen. (Reader-Harris 2015, 38)

$$S = 22.8 \left( \frac{h_c}{r_c} \right)^{1.4} \left( 1 - \frac{2r_c}{D(1-\beta)} \right)^4 \quad (23)$$

Jossa	$S$	lian vaikutus purkaukertoimeen	[-]
	$h_c$	likakerroksen paksuus	[m]
	$r_c$	likakerroksen etäisyys reiän reunasta	[m]
	$D$	putken halkaisija	[m]
	$\beta$	halkaisijasuhde	[-]

Mitä pienempiä halkaisija ja halkaisijasuhde ovat, sitä suurempi on myös yhtälön antama likaantumisvaikutus purkaukertoimelle. Putken pinnan likaantuminen on suurempi epävarmuustekijä kuin laipan likaantuminen ja edellisen yhtälön tulos riippuu voimakkaasti halkaisijasuhteesta.

## 8.5 Muut huomiot paine-eroon perustuvassa mittauksessa

Vaikka tilavuusvirran mittauksessa tarvitsee määrittää useita apusuureita kuten lämpötila ja paine, on tärkeää ymmärtää, että suurin virhe koostuu virtausmittauksesta itsestään. Paine-eroon perustuvassa tekniikassa suurin virhe aiheutuu purkaukertoimen ongelmallisesta määrittämisestä sekä sen muuttumisesta virtausominaisuuksien muuttuessa. Tämän vuoksi standardointi, älykkäät paine-eromittarit sekä mittarit, joilla pystytään vaikuttamaan virtausprofiiliin, edistävät mittauksen tarkkuutta ja luotettavuutta. Lisäksi virtausprofiiliin voidaan vaikuttaa esitellyillä tasauslevyillä ja putkipakoilla.

## 9 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä kandidaatintyössä tarkasteltiin yleisimpiä paine-eroon perustuvia virtausmittaus-tekniikoita ja niiden teoriaa. Ensin tarkasteltiin yleisimpiä mittaukseen vaikuttavia parametrejä. Sen jälkeen annettiin myös ohjeita optimaalisen virtausmittarin valintaan erilaisissa toimintaympäristöissä. Lisäksi tarkasteltiin niiden suurimpia käyttö- ja kehityskohteita sekä pyrittiin antamaan vaihtoehtoja tulevaisuuden tutkimuskohteille paineeroon perustuvassa virtausmittauksessa.

Tilavuusvirta on yksi yleisimpiä prosessiin vaikuttavia suureita teollisuudessa. Tilavuusvirran seurannalla pidetään prosessi sallittujen arvojen rajoissa ja sillä voidaan seurata tuotantoa. Vaikka paine-eroon perustuva virtausmittaus on vanha tekniikka, on sitä edelleen tutkittu paljon, ja vanhojen mittareiden heikkouksia on pyritty kompensoimaan uusilla modifioituilla sovelluksilla.

Virtausmittauksessa muiden suureiden mittaus on usein yksinkertaisempaa ja tarkempaa kuin itse virtausmittauksen. Tämän vuoksi suurin virhe aiheutuu juuri tilavuusvirran määrittämisestä. Useat fluidin ja kanavan ominaisuudet vaikuttavat virtaukseen ja täten optimaalisen virtausmittarin valintaan, joten yksittäistä kattavaa ohjetta on vaikeaa antaa. Yritys voi kuitenkin priorisoida esimerkiksi virtausmittareiden edullisuutta, jolloin saatetaan heikentää tahtomatta käyttöikää tai tarkkuutta. Jokaisessa erilaisessa toimintaympäristössä on järkevää pohtia optimaalista ratkaisua.

Kuristuslaipan etuja ovat edullisuus, laaja tutkimuspohja ja hyvä saatavuus. Heikkouksiksi voidaan lukea suuri pysyvä painehäviö, likaantuminen sekä pitkä suoran putkiosuuden tarve. Venturiputken vahvuuksia ovat pieni pysyvä painehäviö, sekä kestävyys, mutta sen heikkouksia ovat kalliimpi hinta. Suuttimen vahvuus on sen vakaa purkauskerroin, mutta pitkä putkiosuuden tarve rajoittaa sen käyttökohteita. V-Conen ja Wafer-Conen vahvuudet ovat pienessä suoran putkiosuuden tarpeessa ja sen ominaisuudessa tasata virtausprofiilia ennen mittauspistettä. Standardoinnin puute on kuitenkin rajoittanut sen leviämistä.

## LÄHDELUETTELO

Bai, Bo-Feng et al. 2014. Numerical Study on Annular-Mist Flow in V-Cone Meter for Wet Gas Metering. Xi'an Jiaotong University. Kiina. AIP Conference Proceedings 2014. Vol 1592. (viitattu 27.3.2016)

Emco Flow Systems. 2007. Hydro-Flow. Spirax Sarco. (viitattu 12.3.2016) Saatavilla: [http://www.konwell.fi/images/esitteet/12\\_virtausmittarit/1\\_vortex-mittarit/EMCO\\_HF\\_virtausmittarit.pdf](http://www.konwell.fi/images/esitteet/12_virtausmittarit/1_vortex-mittarit/EMCO_HF_virtausmittarit.pdf)

Emco Controls. 2013. EMCO ISA 1932 Nozzle Type DES. viitattu (25.3.2016) Saatavilla: <http://www.emcocontrols.com/357/emco-isa-1932-nozzle>

Emerson Process Management. 2010. Fundamentals of Orifice Meter Measurement. Yhdysvallat. Daniel Measurement and Control Inc. (viitattu 29.2.2016) Saatavilla: <http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Daniel%20Documents/Fundamentals-of-Orifice-Measurement-techWpaper.pdf>

Emerson Process Management. 2016. Daniel Straightening Vanes. Yhdysvallat. Emerson Electric Co. (viitattu 13.3.2016) Saatavilla: <http://www2.emersonprocess.com/en-us/brands/daniel/flow/flow-accessories/pages/straightening-vanes.aspx>

Engineering ToolBox. Orifice, Nozzle and Venturi Flow Rate Meters. Saatavilla: [http://www.engineeringtoolbox.com/orifice-nozzle-venturi-d\\_590.html](http://www.engineeringtoolbox.com/orifice-nozzle-venturi-d_590.html)

Ghassemi, Hojat. Fasih, Hamidreza Farshi. 2011. Application of small size cavitating venturi as flow controller and flow meter. Flow measurement and instrumentation. Lokakuu 2011. Vol 22. (viitattu 30.1.2016) (ejournal)

Groebner. 2016a. Straightening Vanes and Flow Conditioners. SV-8 8'' Straightening Vane. Yhdysvallat. (viitattu 27.3.2016) Saatavilla: <http://shop.groebner.com/AdvancedWebPage.aspx?cg=891&cd=3&SKUTYPE=202&SKUFLD=SKU&WEBID=9163>

Groebner. 2016b. Straightening Vanes and Flow Conditioners. FC-6 6'' Flow Conditioner. Yhdysvallat. (viitattu 27.3.2016) Saatavilla:

<http://shop.groebner.com/advancedwebpage.aspx?cg=891&cd=3&SKUTYPE=202&SKUFLD=SKU&DM=1250&WEBID=9178>

He, Deng-Hui & Bai, Bo-Feng. 2014. Two-phase mass flow coefficient of V-Cone throttle device. *Experimental Thermal and Fluid Science*. Syyskuu 2014. Vol 57. (viitattu 12.3.2016) (ejournal)

HelloTrade. Flow Straighteners. Intia. (viitattu 27.3.2016) Saatavilla: <http://www.hellotrader.com/seal-control-pte/flow-straighteners.html>

Huang, Shanfang et al. 2012. Study on discharge coefficient of perforated orifices as a new kind of flowmeter. *Experimental Thermal and Fluid Science*. Huhtikuu 2012. Vol 46. (viitattu 27.3.2016) (ejournal)

Incropera et al. 2015. Principles of Heat and Mass Transfer. Wiley. 7. painos. Intia. International Student Version. 1050 s. ISBN: 978-81-265-4273-4

Intra Automation BSL. 2011. Orifice plates and flanges. (viitattu 1.3.2016) (Oy Säättö Ab:n sivuilla) Saatavilla: <http://www.saato.fi/datafiles/userfiles/File/Intra-Automation%20mittalaipat.pdf>

ISO 5167-1. 2003. Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full. Technical Committee ISO/TC 30. Toinen painos. Sveitsi: ISO. 33 s.

Larjola, Jaakko et al. 2013. Virtaustekniikka I ja II –kurssimoniste. (tekninen raportti) Lappeenranta. Lappeenrannan Teknillinen yliopisto. Saatavilla: [http://moodle.lut.fi/pluginfile.php/88356/mod\\_resource/content/1/VT\\_luentomoniste\\_2013.pdf](http://moodle.lut.fi/pluginfile.php/88356/mod_resource/content/1/VT_luentomoniste_2013.pdf) (vaatii kirjautumisen)

Liptak, Béla G. 2003. Process Measurement and analysis. ISA. 1. painos. Yhdysvallat. CRC Press. 1920 s. ISBN: 978-0849310836

McCrometer. 2012. Advanced Differential Pressure flow meter technology. Yhdysvallat. (viitattu 25.3.2016) Saatavilla: <http://www.mccrometer.com/library/pdf/24509-49.pdf>



- McCrometer. 2013. V-Cone Flow Meter Technical Brief. Yhdysvallat. (asennusmanuaali) (viitattu 25.3.2015) Saatavilla: <http://www.mccrometer.com/library/pdf/24517-16.pdf>
- Omega engineering Inc. 2015a. Mass Flow Meters. Yhdysvallat. (viitattu 25.3.2015) Saatavilla: [http://www.omega.com/literature/transactions/volume4/T9904-10-MASS.html#mass\\_2](http://www.omega.com/literature/transactions/volume4/T9904-10-MASS.html#mass_2)
- Omega engineering Inc. 2015b. Vortex flow meter. (viitattu 25.3.2016) Yhdysvallat. Saatavilla: <http://www.omega.com/prodinfo/vortex-flow-meter.html>
- Peters et al. 2004. Testing the Wafer V-Cone flowmeters in accordance with API 5.7 “Testing Protocol for Differential Pressure Flow Measurement Devices” in the CEESI Colorado test facility. Flow measurement and instrumentation. Syyskuu 2006. Vol 17. (viitattu 20.3.2016) (ejournal)
- Reader-Harris et al. 2001. Discharge coefficients of Venturi tubes with standard and non-standard convergent angles. Flow measurement and instrumentation. Huhtikuu 2001. Vol 12. (viitattu 30.1.2016) (ejournal)
- Reader-Harris, Michael. 2015. Orifice Plates and Venturi Tubes. Sveitsi. Springer International Publishing. 393 s. ISBN 978-3-319-16880-7 (eKirja)
- Shen J. S. et al. 1995. A performance study of a V-Cone meter in swirling flow. North Sea Flow Measurement Workshop. Norja. Norwegian Society of Chartered Engineers. Saatavilla: <http://www.mccrometer.com/library/pdf/24509-63.pdf>
- Singh S. N. et al. 2006. Effect of upstream flow disturbances on the performance characteristics of a V-cone flowmeter. Intia. Flow measurement and instrumentation. Helmikuu 2016. Vol 17. (viitattu 5.3.2016) (ejournal)
- SlurryFlo Valve Corp. 2014. Rocket Plates. (viitattu 25.3.2016) Saatavilla: <http://rocketplates.com/>