

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

## Radial-outflow -turbiinin mittalaitteen instrumentointi

Työn tarkastaja: Aki Grönman

Työn ohjaaja: Aki Grönman

Lappeenranta

# TIIVISTELMÄ

Joonas Muikku

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Opinnäytetyön ohjaaja: Aki Grönman

Kandidaatintyö 2016

42 sivua, 12 kuvaa, 1 taulukko, 28 yhtälöä

Tarkastaja: Aki Grönman

Hakusanat: Turbiini, Mittalaite, Mallinnus

Keywords: Turbine, Measurement, Instrument, Modeling

Kandidaatin tutkielmassa ”*Radial-outflow -turbiinin mittalaitteen instrumentointi*” selvitetään Lappeenrannan teknillisen yliopiston virtaustekniikan laboratorion suunnitteleman tutkimuslaitteen mittalaitteiden valinta ja sijoitus. Tutkielman tavoitteena on selvittää mittalaitteeseen soveltuvat mittauslaitteet, sekä niiden fyysinen paikka lopullisessa mittalaitteessa. Mittauslaitteiden valintaan vaikuttaa muun muassa virtauksen fyysiset ominaisuudet, sekä mittausolosuhteet. Tutkielman pohjana on käytetty kattavaa määrää referenssitutkimuksia, sekä erinäisiä virtaustekniikan lähteitä. Myös projektin johtajan kanssa käytyjä kokouksia on käytetty lähteenä instrumentoinnin suunnittelussa. Tutkielma tarjoaa kyseessä olevaan mittalaitteeseen soveltuvat mittausinstrumentit, sekä oleellista tietoa instrumenttien sijoittumisesta mittalaitteeseen. Huomioiden muuttuvien tekijöiden suuri määrä, sekä mittausjärjestelyiden tarkkuus, ei ole oleellista tutkimuksen kannalta tarjota tarkkoja millimetrimittaisia instrumentoinnin sijoituspisteitä, vaan sen sijaan mahdollisimman tarkka ja sovellettavissa oleva suositus mittausinstrumentoinnin sijoitukselle.

Tutkielmassa suoritettavan instrumentoinnin ja myöhemmin suoritettavien virtausmittausten perusteella kyetään mallintamaan matalan siipiprofiilin virtausprofiilia tarkemmin kuin ennen. Matalan siiven virtauspintojen aiheuttavat jättöreunan pyörteet ovat tarkemmin laskettavissa ja mallinnettavissa tuloksien avulla. Lopulliset mittaustulokset tulevat julkiseen käyttöön, ja mahdollistavat matalien siipiprofiilien tarkemman matemaattisen mallinnuksen. Lopullinen mittalaitteen valmistaminen toteutetaan yhdessä Saimaan ammattikorkeakoulun kanssa. Mittalaitteen käyttöönotto ja mittausdatan tallentaminen alkavat keväällä 2017.

## **ALKUSANAT**

Tutkielma on tarjonnut minulle henkilökohtaisesti laajaa näkemystä virtausteknisten mittausten suorittamisesta, sekä järjestämisestä. Tutkielma on tehty osana virtaustekniikan laboratorion projektia, eikä se olisi ollut mahdollinen ilman projektin johtajaa Aki Grönmania tai Lappeenrannan teknillistä yliopistoa ja virtaustekniikan laboratoriota.

## SISÄLLYSLUETTELO

<b>Tiivistelmä</b>	2
<b>Alkusanat</b>	3
<b>Sisällysluettelo</b>	4
<b>Symboli- ja lyhenneluettelo</b>	5
<b>1 Johdanto</b>	8
<b>2 Virtausmittaukset</b>	9
2.1 Periaate .....	9
2.2 Tavoitteet .....	9
2.3 Toteutus .....	10
<b>3 Mittalaitteet</b>	13
3.1 Virtausyhtälöt.....	13
3.1.1 Teoreettinen kokoon puristumaton häviötön virtaus.....	13
3.1.2 Kokoon puristuvat virtaukset.....	15
3.2 Mittalaitteiden teoriaa.....	19
3.2.1 Termiset mittalaitteet.....	19
3.2.2 Pitot-staattiset putket .....	21
3.2.3 Mekaaniset mittalaitteet.....	24
3.2.4 Optinen mittaus .....	25
3.3 Mittauksissa huomioitavaa .....	26
<b>4 Radial-outflow -turbiinin mittalaite</b>	29
4.1 Mittalaite.....	29
4.2 Mittausjärjestelyt.....	30
4.2.1 Valitut mittalaitteet.....	32
4.2.2 Mittalaitteiden sijoitus .....	34
4.2.3 Mittauksissa huomioitavaa .....	41
4.3 Mittalaitteen sovellutukset.....	41
4.3.1 Optinen virtausmittaus.....	42
4.3.2 Säädetävät siipikulmat.....	42
4.3.3 Tilava virtauskanavisto.....	42
<b>5 Johtopäätökset</b>	44
<b>Lähdeluettelo</b>	45

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

### Roomalaiset aakkoset

A	Pinta-ala	[m <sup>2</sup> ]
C	Ominaislämpökapasiteetti	
D	Halkaisija	[m]
d	Derivaatta	
f	Taajuus	[Hz]
h	Entalpia	[kJ/mol]
j	Otoskeskiarvo	
K	Kalibrointikerroin	
L	Poraussyvyys	[m]
m	Massa	[kg]
n	Mittausten määrä	[kpl]
p	Paine	[Pa]
R	Vastus	[Ω]
s	Otoshajonta	
T	Lämpötila	[°C]

t	Aika	[s]
U	Jännite	[V]
u	Sisäenergia	[J]
V	Tilavuus	[m <sup>3</sup> ]
w	Virtausnopeus	[m/s]
x	Etäisyys	[m]

**Kreikkalaiset aakkoset**

$\gamma$	Ominaislämpötilakerroin	
$\Delta$	Muutos	
$\varepsilon$	Kokoonpuristuvuuskerroin	
$\theta$	Säteiden välinen kulma	[°]
$\lambda$	Aallonpituus	[nm]
$\rho$	Tiheys	[kg/m <sup>3</sup> ]

**Alaindeksit**

a	Anturi
dyn	Dynaaminen
in	Sisäänmeno
out	Ulostulo

P Paine

p Piste

stat Staattinen

u Universaali

V Tilavuus

w Virtaus

### **Vakiot**

R Ideali kaasuvakio [J/Kmol]

### **Lyhenteet**

CFD Computational Fluid Dynamics  
(suom. Numeerinen virtausmallinnus)

## 1 JOHDANTO

Tässä tutkielmassa kuvataan Lappeenrannan teknillisen yliopiston virtaustekniikan laboratorion radial-outflow -turbiinia varten tehdyn mittalaitteen toimintaperiaate, sekä selvitetään parhaat mahdolliset mittausjärjestelyt. Mittausjärjestelyitä suunniteltaessa on huomioitava mitattavat suuret, mittaustarkkuus, mittalaitteiden koko, sekä muut mitoitusta mahdollisesti rajaavat tekijät.

Tutkielma koostuu erilaisten mittausmenetelmien selvityksestä, mittausmenetelmien soveltuvuudesta kyseessä olevaan projektiin, mittausjärjestelyiden pohdinnasta ja mahdollisista sovelluksista. Tutkielmassa parhaaksi todettu mittausjärjestely tullaan toteuttamaan mittalaitteen valmistuksessa yhteistyössä Saimaan ammattikorkeakoulun kanssa.

## **2 VIRTAUSMITTAUKSET**

Virtaavan aineen mittaamisessa yhdistyy aina kaksi mittausta. Voidaan ajatella jokaisen mittalaitteesta saadun arvon muodostuvan kineettisestä ja dynaamisesta osasta. Seuraavassa kappaleessa käydään läpi virtausmittausten yleisimpiä periaatteita ja tavoitteita, jotka ovat välttämättömiä mittaussuunnittelun onnistumisen kannalta, sekä, virtausmittausten oikeaopillista toteuttamista.

### **2.1 Periaate**

Virtaavalla aineella on aina useita ominaisuuksia ja mitattavia arvoja. Voidaan ajatella, että osa näistä arvoista on virtaavalla aineella ja samalla aineella lepotilassa samoja, ja osaa arvoista virtaus muuttaa aineen ominaisuuksien mukaan. Kokoonpuristuvat aineet ovat esimerkki aineista, joiden tiheys muuttuu virtauksen aikaansaaman paineen muutoksesta, tulokset muuttuvat, jos oletuksena on pelkästään kinetiikan teoria. Mittausten luotettavuuden kannalta on ymmärrettävä millainen virtaava aine on kyseessä, ja kuinka saatua dataa voidaan tulkita. Mittauksia järjestettäessä tai tulkitessa on ymmärrettävä mitataanko aineen vai virtauksen ominaisuuksia.

Virtausmittauksilla pyritään saamaan todenmukaista ja luotettavaa dataa virtauksen arvoista sekä käyttäytymisestä virtauskanavassa. Virtaavasta aineesta voidaan mitata useita eri arvoja sekä suureita ja on tärkeää suunnitella tarkkaan mitä haluaa tietää.

### **2.2 Tavoitteet**

Virtausmittauksia suoritetaan koska kyseessä olevasta virtauksesta halutaan tietää prosessina enemmän, mahdollisesti halutaan arvojen avulla pyrkiä nostamaan jonkin prosessin hyötysuhdetta, tehostaa toimintaa tai valvoa virtauksen käyttäytymistä. Esimerkkinä virtausmittaustietojen hyödyntämisestä voi toimia tyypillinen voimalaitosympäristö. Tässä tapauksessa voimalaitoksen toiminnan kannalta on hyvin oleellista tietää tietyssä linjassa virtaavan aineen ominaisuuksia, kuten virtausnopeus tai lämpötila. Virtaavan aineen ominaisuudet kertovat prosessikokonaisuuksissa paitsi

virtaavan aineen tilan, myös yleensä hyvin paljon virtaukseen liittyvien komponenttien toiminnasta. Esimerkkivoimalaitosympäristössä voidaan mitata lämmönvaihtimen jäähdytysveden virtausta. Tämän virtauksen virtausnopeus mittausta ja lämpötilamittaus voivat indikoida esimerkiksi lämmönvaihtimen puutteellisesta toiminnasta.

Yksi virtausmittausten tavoitteesta on tuottaa mahdollisimman tarkkaa dataa. Mittauksia suoritettaessa onkin erittäin tärkeää käyttää aina oikein kalibroituja mittalaitteita juuri jokaiselle laitteelle ominaisella ohjeistuksella.

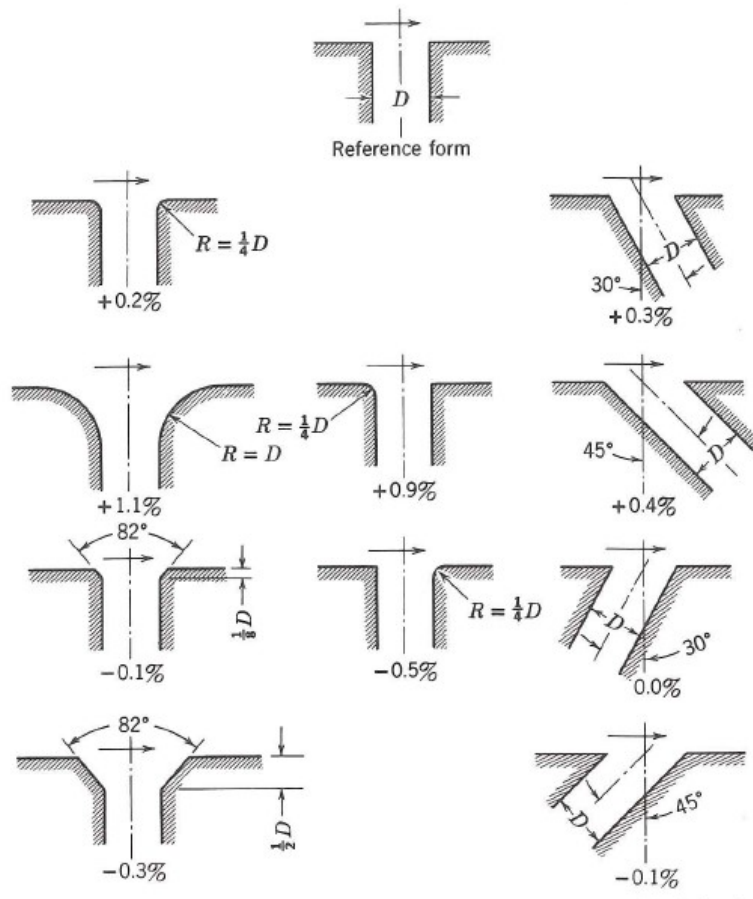
Tämän työn keskiössä olevat virtausmittaustulokset tulevat suunnittelukäyttöön. Työn tarkoituksena on saada tarkkaa dataa radial-outflow -turbiinin virtauksesta. Data voidaan myöhemmin yhdistää virtausmallinnohjelmaan, joka ei tällä hetkellä kykene mallintamaan tämän kokoluokan ja tyyppin virtausta todenmukaisesti. Useiden erilaisten käyttökohteiden takia myös virtausmittausten tarkkuus on tärkeää.

## 2.3 Toteutus

Virtausmittauksen toteutus riippuu hyvin paljon tilanteesta. Yleisimmissä virtauskanavamittauksissa on oleellista tietää virtaavan aineen nopeus, lämpötila tai paine. Virtauksesta voidaan mitata staattisia tai dynaamisia arvoja.

Staattisten paineiden mittaukseen ratkaisu on usein seinämäporaus. Seinämäporauksessa virtauskanavan seinämään tehdään suoraan kulmaan virtausta vasten oleva mittausreikä, josta saadaan paine-erolähtetimen avulla virtauksessa vallitseva staattinen paine. Staattisia arvoja mitattaessa on hyvin tärkeää, että tehty mittausreikä on tehty suorassa kulmassa virtausta vasten ja reikä on oikean muotoinen, kokoinen ja viimeistelty. Kuvassa 1 on esitetty staattisen mittauskanavan työstötavasta johtuvat virheet. Kuten kuvasta 1 käy ilmi, on tärkeää, että mittausreikä on terävä ja täysin tasainen. Kaikki mittausreiän virheet ja epätasaisuudet heijastuvat suoraan mittaus tulokseen ja vääristävät sitä dynaamisten arvojen sekoittuessa staattisiin arvoihin. On huomioitava, että täysin virheetön mittausreikä on melkein mahdoton tehdä, ja porauksesta jää reikään aina porausjätettä, jyysetettä, minkä poisto aiheuttaa puolestaan reiän

pyöristymisen. Staattisia mittauksia suoritettaessa on myös hyvin tärkeää valita mittausta paikka oikein. Mittausreiän ja virtauksen kohtisuoruuden varmistamiseksi on valittava mahdollisimman suora osa mitattavasta virtauskanavasta, mahdollisimman kaukana mutkista tai muista virtausta häiritsevistä laitteista. (Benedict 1984, 339 – 340)



**Kuva 1.** Seinämäporauksen työstötavasta johtuvat virheet. (Benedict 1984, 342)

Dynaamisia arvoja mitattaessa käytössä on aina virtaukseen asetettu sondi. Sondin vaatimuksena voi olla kohtisuora asennus, mutta useassa mallissa sallitaan myös tietyn kulman verran virhettä. Sondi sijoitetaan virtauskanavaan haluttuun kohtaan, kohtisuoraan virtausta kohden. Dynaamisia arvoja mitattaessa on tärkeää valita sondin

koko oikein, jottei sondi itsessään häiritse virtausta merkittävästi. Myös sondin paikka virtauksessa on tärkeä. Tässä työssä suunniteltava turbiinin siipien virtausmittaus luo haasteensa, koska virtauksen käyttäytyminen siiven pinnalla tulee tietää tarkasti, jotta sondi saadaan asetettua virtausta vasten, ja oikealla etäisyydelle siivestä tarkan tuloksen saamiseksi. (Backman, 2006a)

Virtaukseen asetettavan sondin avulla on myös mahdollista mitata staattisia arvoja. Joissakin tapauksissa virtauskanavan seinämärakenteet tai muut syyt tekevät seinämäporauksen mahdottomaksi. Näissä tilanteissa voidaan käyttää sondia, joka asetetaan jälleen kohtisuoraan virtausta kohden. Staattisia arvoja mittaavassa sondissa on kuitenkin mittausreiät suorassa kulmassa virtaukseen nähden. (Grönman, 2016)

### 3 MITTALAITTEET

Virtausmittauksissa käytettävät mittalaitteet voidaan karkeasti jakaa neljään ryhmään. Ensimmäinen osa laitteista toimii lämpövastuksen avulla. Toinen osa laitteista perustuu virtauksen paineeseen, tarkemmin virtauksen staattisen ja dynaamisen paineen eron tarkasteluun. Kolmas mittalaiteryhmä on periaatteeltaan yksinkertaisin ja koostuu lähinnä virtauksessa pyörivästä roottorista ja sen pyörimisnopeusmittauksista. Neljäs ryhmä toimii valon sekä laserin avulla.

#### 3.1 Virtausyhtälöt

Virtausmittaukset perustuvat aina fysikaalisiin ilmiöihin ja arvoihin, jotka ovat johdettavissa teoriatasolle. Virtausta voidaan tarkastella pelkästään teoreettisena mallina yhtälöiden avulla ja näiden yhtälöiden ymmärtäminen, sekä käyttäminen ovat olennaisia osia virtausmittausta suunniteltaessa tai toteuttaessa.

##### 3.1.1 Teoreettinen kokoon puristumaton häviötön virtaus

Kaikki virtausyhtälöt perustuvat energian säilymisen lakiin. Massa ja massan sisältämä energia säilyvät aina virtauksessa (Yhtälö 1).

$$\dot{m}_{in} = \dot{m}_{out} \quad (1)$$

Kun yhtälössä 1 otetaan huomioon virtaavan aineen tiheys, joka oletetaan vakioksi, saadaan:

$$\left(\frac{\rho V}{\Delta t}\right)_{in} = \left(\frac{\rho V}{\Delta t}\right)_{out} \quad (2)$$

Nyt tunnettaessa virtauskanavan pinta-ala  $A$  voidaan yhtälöä 2 jatkaa edelleen muotoon:

$$\frac{V}{\Delta t} = \int \frac{\Delta x dA}{\Delta t} = \int v_p dA \quad (3)$$

Nyt yhtälö kuvaa tietyn tilavuuden kulkemista määrätyn pinta-alan läpi tietyssä ajanjaksossa. Yhtälössä  $v_p$  kuvaa virtausnopeutta tietyssä pisteessä. Yleensä kuitenkin yksinkertaisempaa on käyttää keskimääräistä virtausnopeutta  $v$  (Yhtälö 4).

$$v = \frac{\int v_p dA}{A} \quad (4)$$

Nyt voidaan johtaa myös yhtälöstä 1 yhtälö 5 kun käytetään keskimääräistä virtausnopeutta.

$$\dot{m} = \rho A v = \text{vakio} \quad (5)$$

(Benedict 1984, 395–396)

Yllä esitetyt teoreettiset laskelmat pitävät paikkaansa niin kokoon puristumattomalle virtaukselle kuin kokoon puristuvallakin virtaukselle. Nesteiden voidaan olettaa olevan virtausaineena lähestulkoon aina kokoon puristumattomia, mutta ilman kokoon puristuvuus on huomioitava aina kun ylitetään 0,3 Machin luku. (Grönman, 2016)

### 3.1.2 Kokoon puristuvat virtaukset

Tässä työssä keskitytään kokoonpuristuviin kaasuvirtauksiin eli kaasudynamiikkaan kokoon puristumattomien nestevirtausten eli hydrauliiikan sijaan. Kaasumainen virtaava aine kuten esimerkiksi ilma muuttuu hyvin radikaalisti paineen alla. Virtauksen aiheuttama paine ilmenee virtaavassa ilmassa lämpötilan, sekä tiheyden muutoksina. Kokoon puristuvien kaasumaisten virtausaineiden teoreettiseen laskentaan vaaditaan omat yhtälönsä.

Kokoonpuristumisen takia tapahtuvia kaasun arvojen muutoksia käsitelläkseen on tunnettava mitattava kaasu tarkasti. Mittatilanteessa mitattava kaasu eli ilma voidaan olettaa ideaalikaasuksi käytettävällä painetasolla. Alla on kuvattu ideaalikaasun tilayhtälö yhtälössä 6.

$$\rho = \frac{p}{RT} \quad (6)$$

Tilayhtälössä on lämpötilan  $T$ , paineen  $p$  ja tiheyden  $\rho$  lisäksi jokaiselle kaasulle tyypillinen kaasuvakio  $R$ . Kaasuvakio voidaan ilmaista myös yleisen kaasuvakion  $R_u$  avulla yhtälöllä 7, jossa on myös kaasukohtainen molekyylivakio  $M_{kaasu}$ .

$$R = \frac{R_u}{M_{kaasu}} \quad (7)$$

Kokoonpuristuvan kaasun sisäenergia  $u$  on oleellisessa roolissa, kun määritetään kaasun tilaa. Sisäenergian avulla on mahdollista lausua ominaislämpökapasiteetti vakiotilavuudessa  $c_v$  (Yhtälö 8).

$$c_v = \left( \frac{du}{dT} \right)_v = \frac{du}{dT} \quad (8)$$

Yllämainitussa yhtälössä alaindeksi  $v$  kuvaa muutosta vakiotilavuudessa (Yhtälö 9).

$$v = \frac{1}{\rho} \quad (9)$$

Yhtälö 8, joka kuvaa ominaislämpökapasiteettia vakiotilavuudessa voidaan uudelleen järjestellä yhtälöksi 10.

$$du = c_v dT \quad (10)$$

Nyt sisäenergian muutos  $du$  voidaan ilmaista integraaliyhtälönä 11.

$$u_2 - u_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_v dT \quad (11)$$

Sisäenergian muutos on erittäin hyödyllinen tieto, koska tämän avulla voidaan määrittää kaasun tilanmuutos pisteiden 1 ja 2 välillä. Kun virtauksessa jokin arvo pysyy vakiona pisteiden 1 ja 2 välillä, voidaan puhua osittain ideaalisesta virtauksesta. Tutkielman tapauksessa kyseessä on hieman muunnellun isokoorisen prosessin tilanne, jossa tilavuuden sijasta tilavuusvirta pysyy vakiona. Nyt voidaan olettaa, että ominaislämpökapasiteetti  $c_v$  on vakio, jolloin yhtälö 11 saadaan muotoon (Yhtälö 12).

$$u_2 - u_1 = c_v(T_2 - T_1) \quad (12)$$

Sisäenergian ollessa virtaavan kaasun yksi ominaisuus, on entalpia,  $h$ , toinen mitattava ominaisuus. Entalpien ja sisäenergian välillä on yhteys (Yhtälö 13)

$$h = u + \frac{p}{\rho} \quad (13)$$

Entalpia, aivan kuten sisäenergiakin, on vain lämpötilasta riippuvainen. Nyt yhtälöstä 6 voidaan johtaa yhtälö 14.

$$\frac{p}{\rho} = RT \quad (14)$$

Myös entalpiaan liittyy ominaislämpötilakapasiteetti, mutta tällä kertaa vakio paineessa,  $c_p$  (Yhtälö 15).

$$c_p = \left( \frac{dh}{dt} \right)_p \quad (15)$$

Aivan kuten sisäenergian yhtälöissä, voidaan entalpian yhtälötkin saattaa samaa kaavaa käyttäen lopulliseen muotoon (Yhtälö 16).

$$h_2 - h_1 = c_p(T_2 - T_1) \quad (16)$$

Nyt sisäenergian ja entalpian yhtälöistä saadut ominaislämpötilakapasiteetit voidaan saattaa yhtälöön 17.

$$c_p - c_v = R \quad (17)$$

Myös ominaislämpötilakerroin  $\gamma$  voidaan määrittää yhtälöllä 18.

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} \quad (18)$$

Myös ominaislämpökapasiteettien suhteena tunnettu  $\gamma$  on ilmalle 1,4.

Edellä mainittujen yhtälöiden avulla voidaan määrittää tietylle kaasulle pisteiden 1 ja 2 välillä niin sisäenergian kuin entalpiankin muutos, jolloin pystytään laskemaan kaasun eri ominaisuuksien arvoja pisteessä 2 kun tunnetaan riittävästi arvoja pisteessä 1, vaikka kaasu olisikin kokoonpuristuvaa. (Munson B, et al., 600 – 602)

## 3.2 Mittalaitteiden teoriaa

Jokainen virtausmittauksissa käytettävä laite perustuu johonkin fysikaaliseen ilmiöön ja on siten selitettävissä myös teoriatasolla kaavojen avulla. Tässä kappaleessa keskitytään virtausmittauksissa käytettäviin erilaisiin mittalaitetyyppeihin ja niiden fysikaalisiin yhtälöihin.

### 3.2.1 Termiset mittalaitteet

Virtausmittauslaitteet voidaan jakaa neljään kategoriaan toimintatapansa perusteella. Ensimmäinen ryhmä on termodynamiikkaan perustuvat mittalaitteet eli termiset mittalaitteet. Termiset mittalaitteetkin voidaan jakaa vielä kahteen alaryhmään toimintatapansa perusteella.

Ensimmäisessä alaryhmässä yksinkertaistettu idea on, että virtauskanavaan asetetaan lämmitetty kappale, jonka lämmönjohtokerroin on tunnettu tarkasti. Nyt kappaleen lämpötilaa tarkkaillaessa huomataan lämpötilan lasku. Lämpötilan lasku johtuu virtauskanavan ja lämmitetyn vastuksen lämpötilaerosta, joka pyrkii termodynamiikan mukaan tasoittumaan konvektiolla ja säteilyllä. Säteilyn osuus tällaisessa tilanteessa voidaan olettaa mitättömäksi, jolloin jäähtymisen voidaan ajatella tapahtuvan yksinomaan pakotetun konvektion avulla. Kun verrataan vastuksen normaalia lämpötilaa tietyllä sähkövirralla pakotetun konvektion tilaan virtauskanavassa, saadaan laskettua lämpötilaeroista virtausnopeus (Yhtälö 19).

$$\frac{U^2}{R} = hA \cdot (T_w - T_a) \quad (19)$$

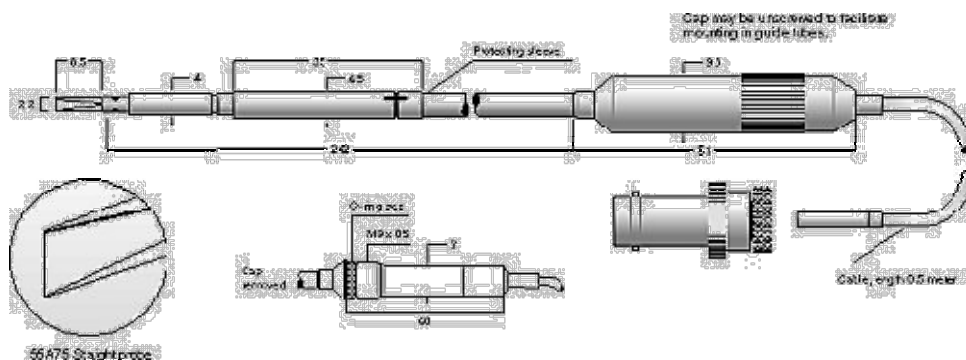
Tyypillinen terminen mittalaite on terminen anemometri. Termistä anemometriä käytettäessä on huomioitava virtaavan aineen ominaisuudet ja anturin konstruktio.

Lämmönsiirtokerroin  $h$  saadaan Kingin yhtälön mukaan (Yhtälö 20) kun  $a$  ja  $b$  ovat anturista ja ilmasta riippuvia vakioita

$$h = a + b \cdot (\rho w)^{0,45} \quad (20)$$

Nyt yhtälö huomioi myös virtaavan aineen nopeuden sekä aineiden ominaisuudet. Alkuperäisen Kingin yhtälön mukaan lämmönsiirtokerroin on suoraan verrannollinen virtausnopeuden  $w$  neliöjuureen, mutta nykyinen potenssiin korotus on vakiintunut arvoon 0,45. (Backman, 2006a)

Toinen alaryhmä koostuu sähköisistä virtausmittauslaitteista, joiden toiminta perustuu resistanssin muutokseen. Sähköinen kytkentä voidaan tehdä joko vakiolämpötila- tai vakiovirtakytkennällä. Nykyaikaisissa anemometreissä tekniikan kehittyminen on mahdollistanut vakiolämpötilakytkennän yleistymisen, sillä se on entistä vakiovirtakytkentää monimutkaisempi. Vakiolämpötilakytkennässä sähköisessä piirissä käytetään neljää vastusta, joista kolme on kiinteitä vastuksia, ja neljäs on terminen mittalaite, jonka vastus muuttuu lämpötilan mukaan. Sähköisessä piirissä on käytetty takaisinkytkettyä Wheatstone-tyyppistä mittasiltaa, jolloin yhden vastuksen resistanssin kasvaminen saa koko mittasillan syöttöjännitteen kasvamaan. Tämä syöttöjännite muunnetaan laitekohtaisella algoritmilla lämpötilan arvoiksi. Tyypillisiä sähköisiä vakiolämpötilakytkennällä varustettuja mittalaitteita ovat mm. suureen tarkkuuteen kykenevät kuormalanka-anemometrit, eli vakiolämpöanemometrit (Kuva 2) (Ibid).

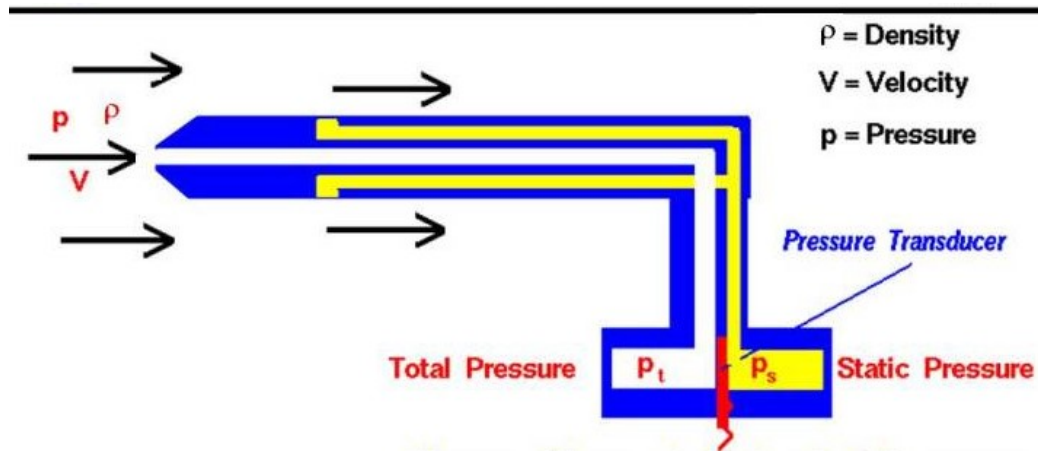


**Kuva 2.** Kuumalanka-anemometri, sekä laiterakenne ja dimensiovaihtoehtoja (Dantec Dynamics, 2013)

Resistanssin muutokseen perustuvilla mittalaitteilla voidaan myös mitata virtauksen lämpötilaa. Vastuslämpötilamittareiden toiminta perustuu metallin lämpösähköiseen ilmiöön, jossa sen resistanssi muuttuu lämpötilan funktiona. Kun laite on kalibroitu oikein, voidaan anturilla tulkita virtauksen lämpötilaa anturin asennuspisteessä. (Punnonen, 2015a)

### 3.2.2 Pitot-staattiset putket

Pitot-staattiset putket perustuvat vanhoihin manometri -mittalaitteisiin. Manometri on mittalaite, joka muodostuu virtaukseen kohtisuoraan asetettavasta putkesta, sekä putkessa olevassa nesteestä, jonka pinnan nousu staattiseen tilaan verrattuna kertoo putkivirtauksesta aiheutuvan dynaamisen-, eli liikkeestä aiheutuvan paineen. Manometrit on kuitenkin nykyään monissa sovelluksissa korvattu pitot-staattisilla putkilla, joissa paine-eron ilmoittaa putkessa sijaitseva paineanturi vesipatsaan sijaan (Kuva 3).



**Kuva 3.** Pitot-staattinen putki. Kuvassa näkyy selkeästi dynaamisen paineen mittauksen aukko päädyssä ja staattisen paineen mittaukset kyljessä, sekä paine-erolähetin. (Nasa, 2015)

Pitot-staattisessa putkessa on useita reikiä painemittausta varten. Koska virtauksessa vaikuttaa sama staattinen paine jokaiseen suuntaan saman vahvuisena, ja sen lisäksi dynaaminen paine virtauksen suuntaan, on päätettävä mitä painetta halutaan mitata. Pitot-staattinen putki on suosittu erityisesti dynaamisen paineen mittaamiseen. Dynaamista painetta mittaavassa pitot-staattisessa putkessa on yleensä kolme tai viisi reikää. Yksi reikä on putken päässä, kohtisuoraan virtausta kohden, ja loput reiät ovat putken kyljessä  $90^\circ$  virtauskulmasta. Kaikista reistä kulkee kanavat paineantureille, jotka mittaavat kunkin kanavan paineen.  $90^\circ$  virtauskulmasta olevat reiät on tarkoitettu staattisen paineen mittaukseen, jolloin kanavien yhdistäminen ja johtaminen yhdelle paineanturille voi lisätä tarkkuutta. Kohtisuoraan virtausta kohden oleva reikä mittaa virtauksen kokonaispainetta. Nyt kokonaispaineen ja staattisen paineen erosta saadaan dynaaminen paine yhtälöillä 21 ja 22.

$$p = p_{dyn} + p_{stat} \quad (21)$$

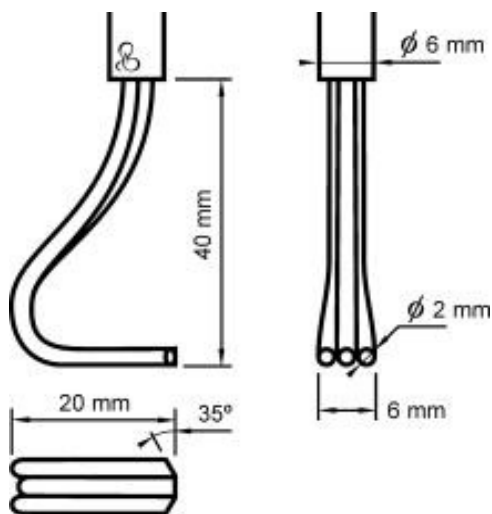
$$p_{dyn} = p - p_{stat} \quad (22)$$

Nyt virtauksen nopeus voidaan laskea yhtälöstä 23.

$$w = K(1 - \varepsilon) \sqrt{\frac{2 \cdot (p - p_{stat})}{\rho}} \quad (23)$$

, jossa  $K$  on pitot-staattisen putken kalibrointikerroin ja  $(1 - \varepsilon)$  on väliaineen kokoonpuristuvuuden korjauskerroin. Jos virtausnopeudet eivät ylitä 20 metriä sekunnissa, tulee kokoonpuristuvuuden korjauskertoimesta mitättömän pieni ja se voidaan jättää laskusta kokonaan pois. (Backman, 2006a)

Pitot-staattinen putki on yleinen mittaputki, mutta samaan periaatteeseen perustuvia mittaputkia on myös muita. Esimerkiksi cobra-sondit (Kuva 4) ovat pitot-staattisen putken kaltaisia, mutta niillä ei voida mitata pelkkää staattista painetta. Cobra-sondissa on yleensä kolme virtausta kohti olevaa reikää, joista keskimäinen on tavoitteena asettaa kohtisuoraan, jolloin viereiset reiät ovat tiettyssä kulmassa virtausta vastaan. Kokonaispaineen lisäksi cobra-sondi mittaa myös niin sanottua virtauskulmaa, eli virtauksen tarkkaa suuntaa kanavassa sondin kohdalla. (Ibid)

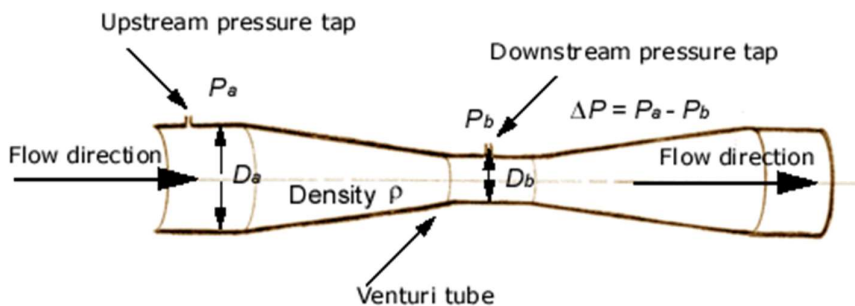


**Kuva 4.** Cobra-sondi. Kuvassa esitetty mahdollisia dimensioita, sekä laitteen periaaterakenne. (Rotadata, 2016)

### 3.2.3 Mekaaniset mittalaitteet

Mekaanisiin mittalaitteisiin luetaan laitteet jotka muuntavat virtausta mekaaniseksi energiaksi tulkintaa varten. Yleisimpiä mekaanisia mittalaitteita on siipipyöranemometri, joka muistuttaa paljolti turbiinia. Pyörivä turbiini asetetaan virtauskanavaan, jonka jälkeen sähköisesti luetusta kierrosnopeudesta voidaan laskea virtausnopeus.

Mekaanisiin mittalaitteisiin voidaan laskea myös kuristuslaipat ja venturiputket (Kuva 5). Kuristuslaipassa tarkoituksena on asentaa virtauskanavaan kiinteä laippa, joka aiheuttaa paine-eron laipan molemmin puolin. Paine-ero voidaan mitata kuristuslaipan molemmilta puolilta staattisen paineen mittauksilla, ja tästä paine-erosta saadaan virtausnopeus, sekä laipan pinta-alan ollessa tiedossa, myös tilavuusvirta. Venturiputkessa idea on sama, mutta siinä putken suppeneva-laajeneva muotoilulla virtausnopeutta kiihdytetään, jolloin saadaan myös aikaan paine-ero. (Backman, 2006b)



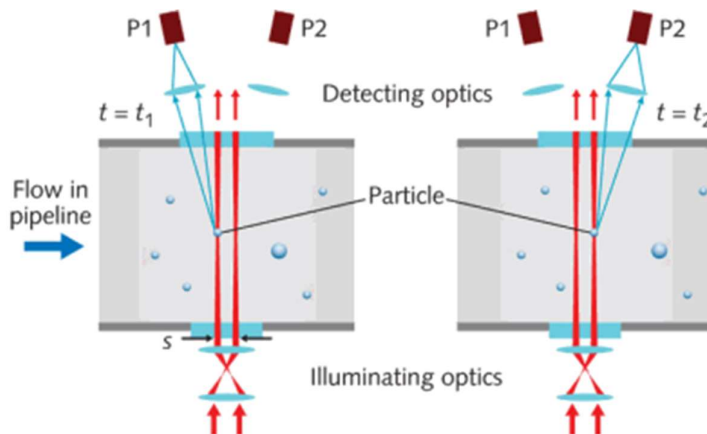
**Kuva 5.** Venturipukti. Kuvassa on esitetty venturiputken rakenne, sekä paineenmittauspisteet. (Efunda, 2017]

### 3.2.4 Optinen mittaus

Optinen mittaus on vaihtoehto silloin, kun mittalaitteiden aiheuttamalle virheelle virtauksessa ei ole varaa ja resursseja on käytössä runsaasti. Optinen mittaus perustuu lasereihin ja valon sirontailmiöön (Kuva 6). Mittauksessa kaksi laseria kohdennetaan ristiin keskelle virtausta, jolloin laserit aiheuttavat risteämäkohdassa interferenssin keskenään, eli lasereiden aallot vuoroin vahvistavat ja heikentävät toisiaan. Virtaukseen syötetään valoa heijastavia partikkeleita. Partikkelit liikkuvat samalla nopeudella kuin ympärillä virtaava neste, ja kun partikkeli kulkee lasereiden muodostamien interferenssiminimien ja -maksimien läpi, siroutuu siitä valoa interferenssikohtaan suunnattuun optiseen anturiin. Laitteisto tunnetaan nimellä Laser Doppler -anometri (Backman 2006a). Kun tunnetaan interferenssiminimin ja -maksimin välinen etäisyys, voidaan partikkelin aiheuttamasta sirontataajuudesta laskea partikkelin nopeus yhtälöllä 24.

$$w = \frac{f_d \lambda}{2 \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (24)$$

Mikäli virtausmittauksessa halutaan selvittää nopeuskomponentteja useammassa dimensiossa, voidaan lasersäteiden määrää lisätä. (Ibid)



**Kuva 6.** Optinen virtausmittauslaite, sekä laitteen toimintaperiaate. Kuvassa esitettynä käytettävät laserit, sekä optiikat ja partikkelit. (Laserfocusworld, 2016)

### 3.3 Mittauksissa huomioitavaa

Virtausmittauksia voidaan toteuttaa useilla eri tavoilla. Ennen mittauksiin ryhtymistä täytyy olla tarkka suunnitelma mitä halutaan mitata, ja kuinka mittaus tulee suorittaa. Erilaiset mittalaitteet soveltuvat erilaisille virtaaville fluideille, ja tarkan tuloksen varmistamiseksi on tunnettava mittalaitteiden toimintaperiaatteet sekä itse virtauksen fysikaalinen käyttäytyminen, kuten kokoonpuristuminen. Yleensä myös merkittävä tekijä on kustannustehokkuus. Virtausmittauksen huolellisella suunnittelulla varmistetaan oikean, sekä tarkoitukseen riittävän mittalaitteen valinta, sekä mittauksen oikeaoppinen toteutus.

Huolellisesta suunnittelusta huolimatta mittauksissa tulee aina virhettä. Mittalaitteiden virheet voidaan jakaa kolmeen ryhmään; karkea virhe, satunnainen virhe ja systemaattinen virhe (Backman, 2013). Karkeaa virhettä mittaustuloksissa esiintyy silloin kun käytettävää mittalaitetta luetaan väärin tai mittalaitetta käytetään väärin. Karkea virhe näkyy mittaustuloksissa selkeästi, ja näin ollen se voidaan heti rajata

lopullisista tuloksista pois, koska selkeästi joku on mennyt pieleen. Vaikka virheelliset tulokset rajataan pois lopullisista tuloksista, on syytä selvittää mistä virhe johtui.

Satunnaista virhettä mittauksissa esiintyy muun muassa tutkittavan ilmiön satunnaisuudesta johtuen. Esimerkkinä virtauksen tilavuusvirta ei ikinä ole täysin vakio, vaikka mitään laitteiston parametreja ei muutettaisi. Yksinkertaisesti satunnaisuustekijät ja lukemattomat yhteensattumat saavat tilavuusvirran mittaustuloksen huojumaan hieman.

Systemaattinen virhe on hankala havaita lopullisista mittaustuloksista, jos tuloksista ei ole tehty laskelmia tai oletuksia. Laskelmien avulla voidaan ennustaa saatavia tuloksia, ja mittalaitteistoon sekä mittauskokemukseen perustuvilla oletuksilla saatuja arvoja voidaan kyseenalaistaa. Systemaattinen virhe voi johtua esimerkiksi laitteen puutteellisesta kalibroinnista tai mittauksessa muodostuvasta virheestä. Systemaattisessa virheessä virheellinen kalibrointi tai huomiotta jätetty osa mittausta aiheuttavat poikkeaman joka ikisessä mittaustuloksessa kaikilla mittauskerroilla. Systemaattisen virheen välttämiseksi on jokaisen mittalaitteen kalibrointiin kiinnitettävä huomiota, sekä jokaisessa mittauksessa tulee ottaa huomioon laite- ja asennuskohtaiset korjauskertoimet.

Kuten mainittua mittaustuloksissa ilmenee aina virhettä verrattaessa todelliseen tilanteeseen. Virhettä ja mittaustuloksia voidaan tarkastella objektiivisemmin, kun selvitetään otoskeskiarvo  $j$ , sekä otoshajonta,  $s$ . Otoskeskiarvon ja otoshajonnan avulla saatuja tuloksia voidaan verrata normaalijakaumaan, kun mittauksia suoritetaan yli 30 kappaletta. Otoskeskiarvo lasketaan yhtälöllä 25.

$$j = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_{n-1} + x_n}{n}$$

(25)

missä termi  $x$  kuvastaa mittauksesta saatua tulosta ja  $n$  mittausten kokonaismäärää. Otoskeskihajonta saadaan yhtälöstä 26.

$$s = \sqrt{\frac{(x_1 - j)^2 + (x_2 - j)^2 + \dots + (x_{n-1} - j)^2 + (x_n - j)^2}{n - 1}} \quad (26)$$

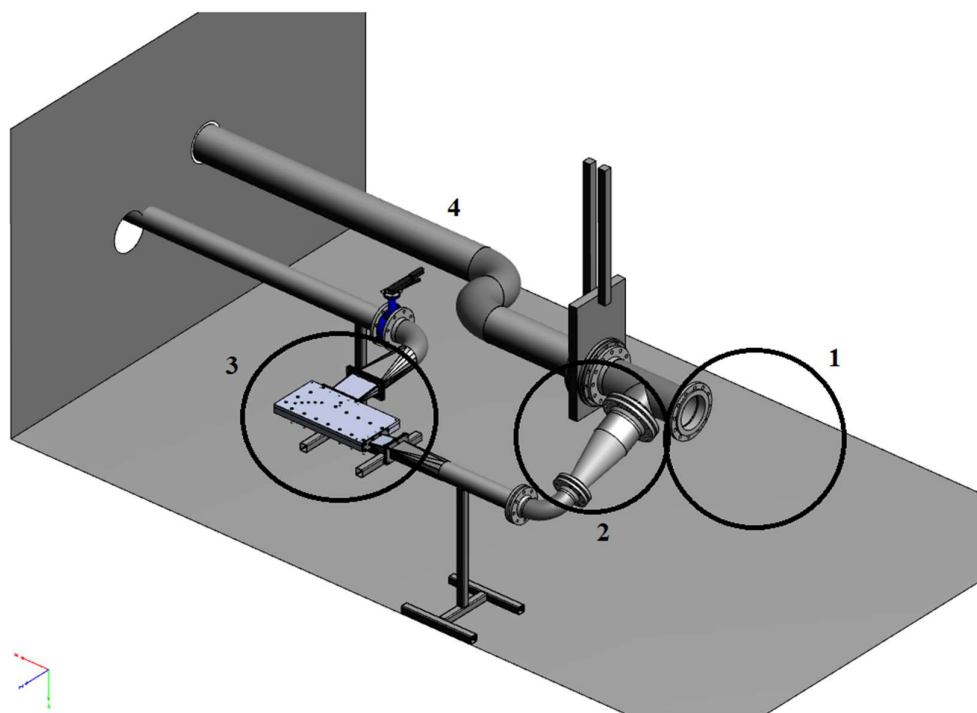
saatua otoskeskihajontaa voidaan nyt verrata normaalijakauman keskihajontaan, jolloin mittausten tarkkuus voidaan itse valita. (Backman, 2013)

## 4 RADIAL-OUTFLOW -TURBIININ MITTALAITE

Seuraavassa luvussa keskitytään tutkielman varsinaiseen kohteeseen, eli Lappeenrannan teknilliselle yliopistolle suunniteltavaan radial-outflow -turbiinin mittalaitteeseen. Luvussa määritellään lähdeaineiston perusteella parhaat ja tarkimmat mahdolliset mittaussj järjestelyt turbiinin mittalaitteelle, nykyisten puitteiden rajoissa. Suunniteltu mittalaitteisto tullaan toteuttamaan ja saatua mittaustietoa tullaan hyödyntämään muun muassa CFD -mallien luomisessa.

### 4.1 Mittalaite

Turbiinin mittalaite muodostuu neljästä pääkomponentista. Ensimmäinen komponentti on kompressor, jolla tuotetaan mittauskanavaan virtaus. Toinen komponentti on virtauksenkokooja. Virtauksenkokoojalla virtaus käytännössä pysäytetään, ja johdetaan ohjainkennoston läpi, jolloin virtauksesta saadaan mahdollisimman tasainen mittauksia varten. Kolmas komponentti on niin sanottu kaskadi, eli virtauskanava johon on sijoitettu tutkittavan turbiinin siipiä vastaavat siivet. Kaskadissa virtaus käännetään siipien avulla, jolloin siiven pinnalle muodostuu samanlainen virtauksen nopeusprofiili kuin todenmukaisessa turbiinin käyttötilassa. Kaskadi on mittalaitteen ydin, ja nimenomaan kaskadissa tapahtuu kaikkein oleellisin mittaustyö. Neljäntenä komponenttina käsitellään virtauskanavistoa joka yhdistää kaikki edeltävät komponentit. Virtauskanaviston tulee olla hyvin eristetty sekä asianmukaisesti suunniteltu tasaisimman mahdollisen virtauksen takaamiseksi. Myös virtauskanavistoon sijoitetaan mittalaitteita. Pääkomponentit ovat numeroituna kuvassa 7.



**Kuva 7.** Radial-outflow turbiinin mittalaite. Kuvassa positio 1 kuvastaa kompressorin paikkaa. Positio 2 on virtauksen kokooja. Positio 3 on turbiinikaskadi ja positiolla 4 on merkitty virtauskanavistoa.

## 4.2 Mittausjärjestelyt

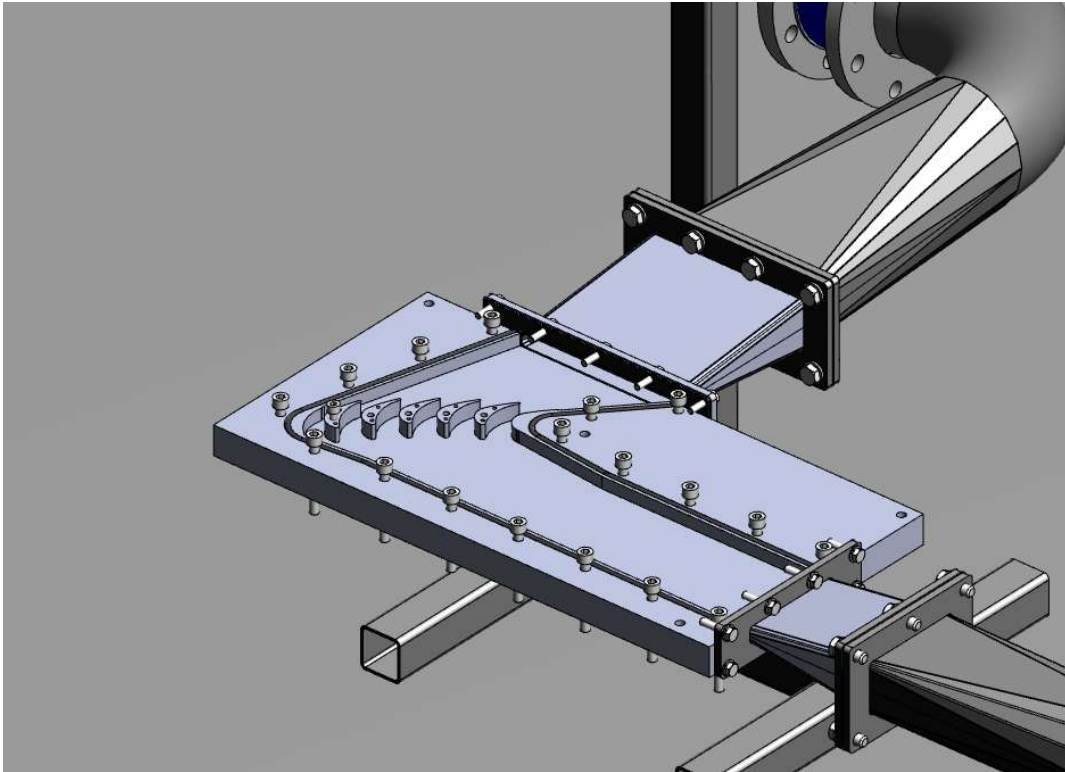
Mittalaite itsessään on suunniteltu, jolloin työn tavoitteeksi jää nimenomaan mittauksien suunnittelu. Mittauslaitteet jaetaan edellä mainittujen komponenttien kesken, jolloin jokaiseen komponenttiin sijoitetaan erikseen tarvittavat mittauslaitteet. Lämpötila muuttuu virtaavaan fluidin ominaisuuksien muuttuessa, mutta on oleellisen tärkeää tietää niin sanottu ambienttilämpötila. Ambienttilämpötilalla tarkoitetaan ympäristön vallitsevaa lämpötilaa, ja lämpötilaa jossa virtaava fluidi on alkutilassa ja lopulta myös lopputilassa, koska koko mittalaite eristetään ulkopuoliselta lämmönsiirrolta. Virtausmittauksen lämpötilamittaus voidaan suorittaa edellä käsitellyllä termoelementillä. Virtauksen kokoojaan, eli kanaviston osaan jossa virtaus pysäytetään

ja käännetään levyn avulla, sekä suunnataan hunajakenttien avulla, sijoitetaan myös staattisen paineen mittausta. Ennen kaskadia virtauskanavaan sijoitetaan Kiel -putki. Kiel -putkella mitataan virtauksen kokonaispaine ennen siipiä. Kiel -putki on Lappeenrannan teknillisen yliopiston virtaustekniikan laboratorion muokkaama, jolloin sillä voidaan mitata myös lämpötila ennen siivistöä.

Virtauskanavistoon kaskadin taakse sijoitetaan kuristuslaippamittaus, jolla saadaan mitattua virtauskanavan läpi kulkeva fluidin tilavuusvirta. Kuristuslaippa onärkevin sijoittaa viimeiseksi mittalaitteeksi systeemissä, koska kuristuslaippa aiheuttaa aina virtauksessa pyönteilyä ja epätasaisuutta. Tilavuusvirta on pakollinen tieto, kun halutaan saada todenmukainen virtausmalli kaskadin läpi. Tilavuusvirtamittaus on myös systeemiin paineen tuottavassa kompressorissa integroituna, ja voi olla, ettei laippamittaus mahdu systeemiin.

Kaskadissa (Kuva 8) mittauslaitteiston sijoitus on hankalinta. Kaskadissa mittalaitteita on tarkoitus sijoittaa ennen jokaista siipeä, kahden siiven muodostamaan kanavaan useita peräkkäin, sekä jokaisen viiden siiven jälkeen jättövirtaukseen. Mittatietoa halutaan saada juuri ennen virtauksen osumista siipeen, jolloin saadaan mahdollisimman tarkka tieto virtauksen ominaisuuksista alussa ja kaskadin siipien välistä, jolloin mittatieto kertoo siipiprofiilin pinnan tuntumassa esimerkiksi fluidin paineen. Kaskadin jälkeen sijoitetaan mittalaitteet, joilla saadaan selvitettyä virtauksen staattinen paine siiven jälkeen sekä suunta ja siipiprofiilin jälkeisen virtauksen kokonaispaine. Kaskadin jälkeisiin mittauksiin mittalaitteelle rakennetaan tukirakenne, niin sanottu traversio, jonka avulla mittalaitetta voidaan siirtää poikkisuorassa suunnassa virtausta kohden. Tukirakenteen avulla virtauksesta saadaan luotua kaksiulotteinen malli. Kaskadi on kuitenkin virtaushäiriöille erittäin altis paikka, ja siipien välisen kanavan leveys on vain noin 13mm kurkussa ja 38mm jätön reunalla. Esimerkiksi siipien väliseen virtauskanavaan asetettu sondi sotkisi virtauksen, jolloin seuraavan mittapisteen tulokset olisivat vääristyneitä. Huomioitavaa on, ettei virtauskanavan leveys ole täysin vakio koko siiven matkalta, vaan jättöreunalla leveys on noin 38 mm. Myös siiven jälkeen sijoitetun mittapisteen etäisyys on valittava

tarkkaan, liian lähelle sijoitettu virtauskulmanmittaus joutuu virtauksen jälkipyrteeseen, jolloin tulokset ovat epäluotettavia. Liian kauas sijoitettu mittauslaite taas on jo niin etäällä, ettei se suoranaisesti mittaa enää virtauskulmaa tietyn siiven jälkeen, vaan kokonaisvirtauksen suuntaa. Jokaiseen komponenttiin valitut mittalaitteet ja niiden sijoittaminen käsitellään seuraavissa kappaleissa. (Perdichizzi, A. et al., 1992)



**Kuva 8.** Virtauskaskadi. Mallista on poistettu ns. kansi, jolloin mitattavat siivet näkyvät selkeästi.

#### 4.2.1 Valitut mittalaitteet

Kuten edellä on todettu, vaikuttavat mittausolosuhteet mittauslaitteiden valintaan. Virtauskanaviston lopullinen sijainti on tiedossa, sekä kanavan rakenteellinen suunnittelu on valmis. Rajoittavana tekijänä mittauksen järjestelyissä on yliopiston resurssit, jolloin mittauslaitteiden valinta suoritetaan samoja kriteerejä käyttäen kuin

aiempana on mainittu, mutta loppulisiin mittauslaitevalintoihin saattaa tulla pieniä muutoksia. Edempänä tutkielmassa käsitellään myös vaihtoehtoja erilaisista muista mittausjärjestelyistä, joissa resurssien voidaan olettaa olevan rajattomat.

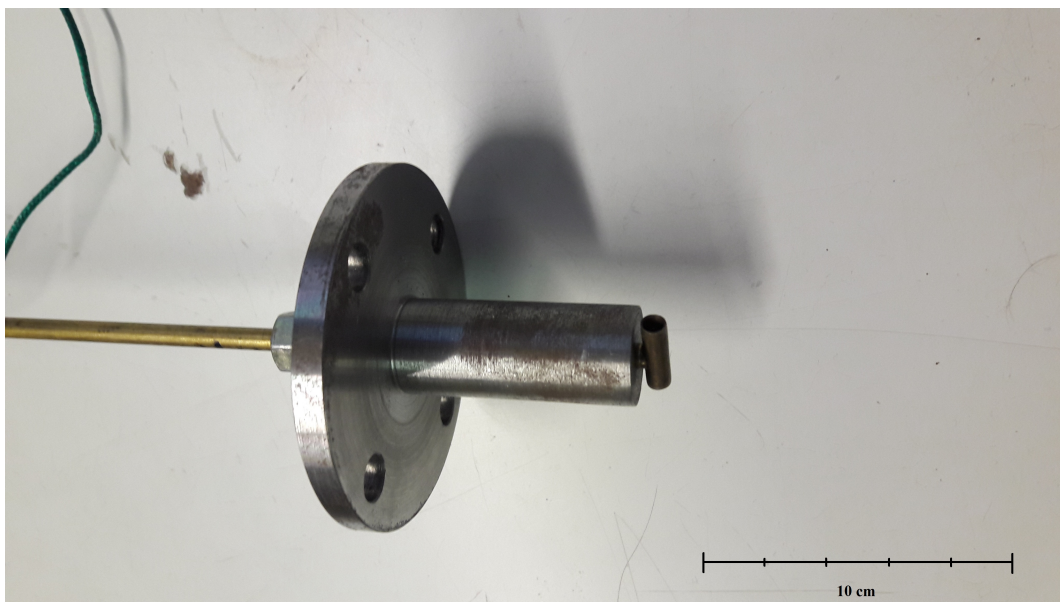
Mittausolosuhteiden voidaan todeta olevan helpot. Virtaus muodostetaan virtauskanavaan paineilmakompressorilla, jonka ilmanotto tapahtuu sisätiloista. Virtauksen lämpötila nousee paineen kasvaessa yli 100 C°:een, jolloin esimerkiksi termoelementit on valittava lämpötilaan sopiviksi. Ilma on myös suhteellisen puhdasta, jolloin mittalaitteiden likaantuminen tai virtauksessa vaurioituminen voidaan sulkea pois. Käytettävä painetaso on noin 2 bar, jolloin painelaitteiden ei tarvitse olla suurille painetasoille suunniteltuja. Mittauslaitteiden valinnassa, sekä asennuksessa tulee huomioida mittalaitteen virtauskanaviston eristys. Virtauskanavisto on eristetty, jolloin lämpövirta ympäröivästä ilmasta virtauskanavaan voidaan olettaa häviävän pieneksi. Eristysmateriaali aiheuttaa kuitenkin virtauskanaviston ulkopinnalle fyysisen rajoitteen asennustöille, jolloin joidenkin laitteiden valintaa tulee harkita, vaikka sopivuus muuten olisi hyvä.

Aikaisemmin läpikäydyistä mittauslaitevaihtoehdoista olosuhteiden takia, lämpötilamittauksiin valitaan termoelementti. Kokonaispaine ja virtausnopeusmittauksiin ennen kaskadia yliopistolta löytyy Kiel -putki, johon on myös yhdistetty termoelementti, tätä laitetta voidaan käyttää mittauksissa sekä lämpötilan että paineen mittauksiin. Staattisen paineen mittaus ennen kaskadia toteutetaan paineeroantureilla. Painemittaus siipiprofiilien välissä toteutetaan virtauskanavan koosta ja mittauksien herkkyydestä johtuen seinämäporauksella asennetuilla staattisen paineen mittaussyhteillä, jotka johdetaan paineskanneriin. Virtauskulmamittaus siipiprofiilin jättöpuolella toteutetaan cobra -sondilla, joka mahdollistaa virtauskulman tarkastelun, sekä paineen määrittämisen. Virtauskulmamittauksen jälkeen kanavistoon sijoitetaan vielä lämpötilamittaus, koska vaikka systeemi on eristetty, halutaan minimoida riski ulkoisista lämpövirroista tekemällä uusi mittaus. Tilavuusvirtamittaus sijoitetaan kanavistoon viimeiseksi ja suoritetaan laippamittauksena.

#### 4.2.2 Mittalaitteiden sijoitus

Mittalaitteiden raakasijoitus on nyt tehty, eli järjestys, sekä sijainti virtauskanavistossa on päätetty. Seuraavaksi on tehtävä mittalaitteiden tarkkasijoitus. Sijoitukseen vaikuttaa oleellisesti virtauksen profiili, jonka on oltava täysin kehittynyt ja turbulenttinen halutun mittaustuloksen saavuttamiseksi. (Benedict 1984 s.479) Virtaus pysäytetään ja käännetään virtauksen kokoojassa, jossa virtaus johdetaan kohtisuoraan levyyn, jonka jälkeen levyn yli muodostunut paine-ero aiheuttaa virtauksen levyn ohi. Näin virtaus tasaantuu huomattavasti. Levyn jälkeen tasaajassa sijaitsee hunajakennosto, jonka tehtävä on edelleen tasata virtausta. Paras mahdollinen paikka virtauksen lämpötila mittaukselle ja staattisen paineen mittaukselle on levyn ja kennoston välissä. Koska pyörteilevä ilma ei juuri vaikuta mittaustuloksiin, määritetään paras mittausta paikka laitteiston asennusvaiheessa, jolloin nähdään mahdolliset fyysiset rajoitteet.

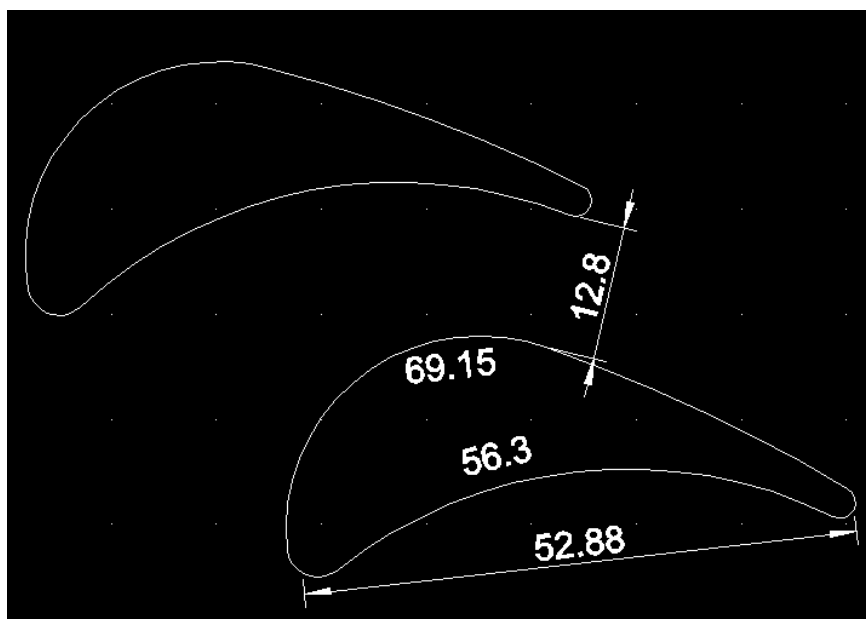
Kaskadille tullessa virtauskanavan muoto muuttuu pyöreästä putkesta nelikulmaiseksi virtauskanavaksi. Tähän nelikulmaiseen virtauskanavaan sijoitetaan Kiel -putki. Sijoituspaikaksi valitaan yhden jänteen etäisyys siivistöstä ylävirtaan (Taulukko 1), jolloin Kiel -putki ei häiritse siipien virtausta, mutta on tarpeeksi lähellä tarkimman mahdollisen mittaustuloksen saamiseksi. Mittaus toteutetaan poraamalla virtauskanavan seinämään mahdollisimman pieni reikä Kiel -putken ja termoelementin asentamista varten. Termoelementti on integroitu Kiel -putkeen, joka asetetaan virtaukseen. Kiel -putken muotoilusta (Kuva 9) nähdään, ettei se ole kovin virtaviivainen. Kiel -putken halkaisija on kuitenkin suhteessa virtauskanavan kokoon niin pieni, ettei sen voida ajatella aiheuttavan suurta häiriötä virtaukseen.



**Kuva 9.** Mittauksissa käytettävä Kiel -putki asennuslaipan kanssa, sekä mittakaava.

Kaskadissa jokaista siipeä edeltää staattisen paineen mittauspiste. Mittaukset toteutetaan seinämäporauksella ja reikään asennetulla sähköisellä paine-eroanturilla. Myös staattisen paineen mittauspisteet voivat aiheuttaa seinämäporausten takia virhettä siipien virtaukseen, joten ne tulee sijoittaa noin yhden siiven jänteen etäisyydelle siipien kärjistä (Taulukko1). Paine-eroantureiden arvot ovat luettavissa mittausnäytöltä.

Kaskadissa siipien väliin tulevat mittauspisteet toteutetaan niin ikään seinämäporauksella. Jokaiseen seinämäporauksella toteutettuun mittayhteeseen asennetaan 3mm halkaisijalta oleva metalliputki, josta paineyhde yhdistetään paine-erolähtettiin. Siiven yläpinta on 69,15 mm pitkä ja alapinta 56,3 mm pitkä, kuten kuvasta 10 näkyy.



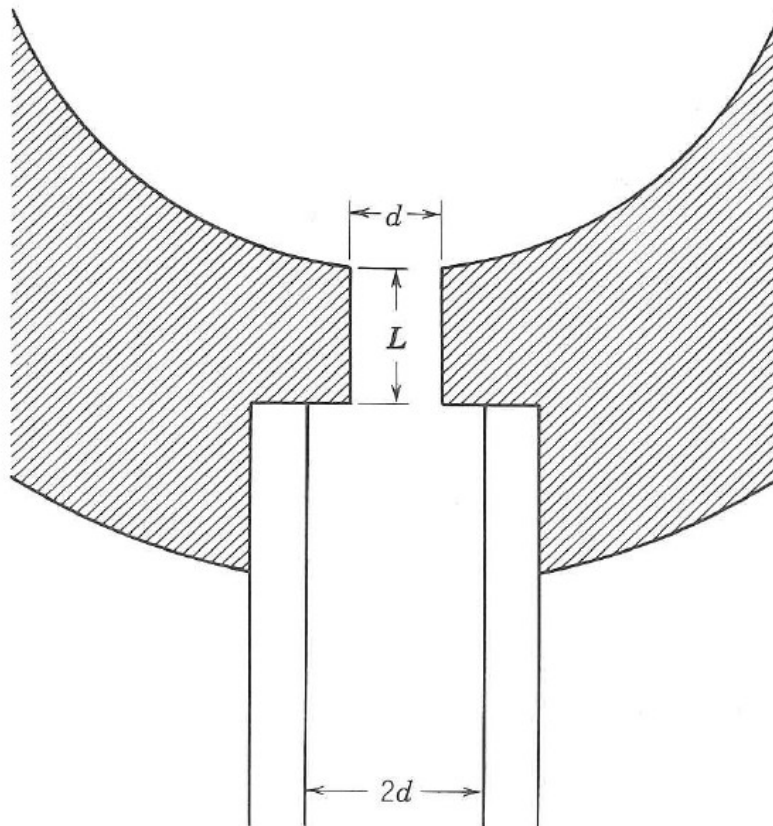
**Kuva 10.** Siipiprofiilin mitat millimetreinä

Paineyhteet asennetaan kahden siiven keskelle siipien väliseen kurkkuun asti, jolloin asennusjanteen pituus on 48 mm. Paineyhteen halkaisija on 3mm, ja suunnitelmassa asennusjanteelle niitä asennetaan viisi kappaletta. Näin ollen yhteiden väliin jää 8 mm väliä. Yhteiden välille on jätettävä hieman tilaa, jotteivät yhteet väärinä toistensa mittaustuloksia. Kuten kuvasta 11 käy ilmi tulee yhteen asentaminen suorittaa niin että porauksen halkaisija  $d$  on puolet yhteen halkaisijasta. Yhteen upotussyvyyden  $L_{yhde}$  ja porauksen halkaisijan suhteen tulee toteuttaa yhtälö 27.

$$1,5 < \frac{L_{\text{seinämä}}}{d_{\text{poraus}}} < 6,0 \quad (27)$$

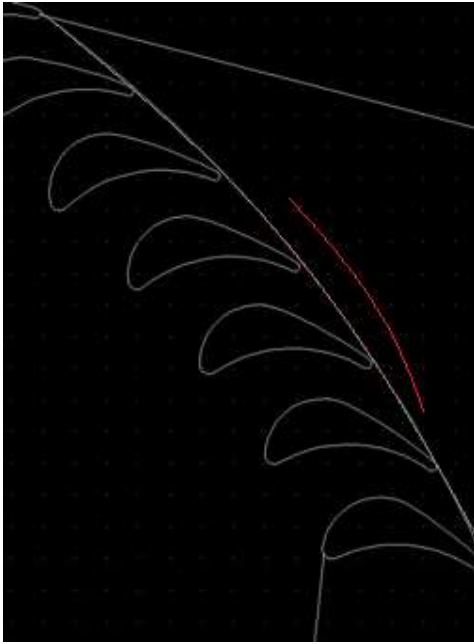
, jossa

$$L_{\text{seinämä}} = L_{\text{putki}} - L_{\text{yhde}} \quad (28)$$



**Kuva 11.** Seinämäporauksen geometria. (Benedict 1984, 340)

Siipien jälkeen asennetaan noin 10 kappaletta paineyhteitä niin että ne mittaavat staattista painetta siipien välisen kurkun puolivälistä seuraavan kurkun puoliväliin, kuten kuvassa 12 havainnollistetaan. Staattiset mittayhteet tulee asentaa siipien suunnan mukaisesti. Siivet muodostavat kaaren, joten mittayhteet asennetaan samalle kaarelle noin 0,2 – 0,4 siiven jänteen etäisyydelle. Nyt yhteet tulevat vierekkäin, joten virtauksesta ei synny häviöitä, joten yhteet voidaan sijoittaa niin lähekkäin kuin rakenteellisesti on järkevää. Asennuskaaren pituus on 77 mm ja se on merkattu kuvaan 12 punaisella. (Benedict 1984 s.340, s.342; Jouini, D. B. M. et.al. 2001.; Arts, T. 1990; Perdichizzi, A. et al., 1992; Funazaki, K. et al., 1997)



**Kuva 12.** Jättöreunan staattisen paineen mittakaari

Jättöreunan staattisen paineen mittauksen ainut tehtävä on todistaa virtauksen symmetrisyys, kun verrataan saatuja tuloksia tuloreunalta saatuihin staattisen paineen mittauksiin. Näitä kahta staattista painetta vertaamalla saadaan isentrooppinen Machin luku. Isentrooppisen Machin luvun avulla voidaan todistaa virtauksen symmetrisyys, kun sitä verrataan siipiprofiilin jälkeisiin Machin lukuihin eri virtausnopeuksilla. (Arts,

1990) Mittauksen ydin tulee jättöreunan staattisten yhteiden jälkeen. Niin kutsuttu traversiomittaus suoritetaan 0,2 – 0,5 siiven jänteen etäisyydeltä jättöpuolelta. Traversiomittauksen, siipiä edeltävän kokonaispaineenmittauksen ja staattisten mittausyhteiden sijoitukseen on käytetty neljää referenssitutkimusta. Tutkimukset sekä niiden instrumentoinnin sijoittelu on taulukoitu taulukkoon 1.

**Taulukko 1.** Referenssitutkimusten tietoja

Tutkielma	a	b	c	d	e	f
1	55	16	55	16	67.647	0.9
2	-	-	34	82.8	55.2	0.9
3	30	-	30	15/50/100	100	-
4	40	16	40	16	40	1

Julkaisu:

1. Aero-thermal performance of a two dimensional highly loaded transonic turbine nozzle guide vane, T. Arts, 1990
2. Incident angle and pitch-chord effects on secondary flows downstream of a turbine cascade, A. Perdichizzi et al., 1992
3. Experimental studies on unsteady aerodynamic loss of a high-pressure turbine cascade, K. Funazaki et al., 1997
4. Aerodynamic performance of a transonic turbine cascade at off-design conditions, D.B.M Jouini et al., 2001

Arvo:

- a. Staattisen paineen mittausetäisyys tulopuolelta [mm]
- b. Staattisen paineen mittausetäisyys jättöpuolelta [mm]
- c. Kokonaispaineen mittausetäisyys tulopuolelta [mm]
- d. Kokonaispaineen ja virtauskulman mittausetäisyys jättöpuolelta [mm]
- e. Siiven jänne [mm]
- f. Virtausnopeus [Ma]

Etäisyys on ilmoitettu taulukon selityksessä aina joko siiven tulo- tai jättökärkeen.

Traversiomittausta varten tehdään viisi reikää jättöpuolelle, joihin traversiomittalaite sovitetaan. Mittaukset suoritetaan kerrallaan aina yhdestä reiästä muiden ollessa tukittuina. Traversiomittalaitteeseen kytketään cobra sondi, jonka avulla saadaan selvitettyä kokonaispaineen lisäksi jättövirtauksen virtauskulma. Kun cobra sondi on kytketty traversiolaitteeseen, voidaan sitä liikuttaa pystysuunnassa poikkisuunnassa virtausta kohden ja näin saada yhdestä mittausreiästä jopa 20 mittaustulosta eri korkeuksilta. Traversiomittaus suoritetaan viidestä reiästä ja jokaiselta mahdolliselta korkeudelta jolloin jättövirtauksesta saadaan 100 datapisteen arvot, eli niin sanottu mittaus grid (suom. verkko).

Traversiomittausten jälkeen virtaukseen asennetaan toinen termoelementti, jonka avulla saadaan mitattua virtauksen lämpötila heti kaskadin jälkeen, ja näin ollen voidaan varmistua mittauksiin vaikuttavista lämpövirroista ja eristysjärjestelyiden toimivuudesta.

Viimeisenä mittauksena suoritetaan viimeinen tilavuusvirtamittaus. Tilavuusvirtamittauksen laippa sijoitetaan virtauskanavaan niin paljon kaskadin jälkeen, ettei kaskadin virtaus häiriinny laipasta. Kaskadin jälkeisen virtauskanavan pituutta ei pystytä vielä varmuudella ilmoittamaan, mutta suoraa virtauskanavaa tarvittaisiin vähintään 22 putken halkaisijan verran. (ISO 5167-2, 2003)

#### 4.2.3 Mittauksissa huomioitavaa

Tärkeä osa mittauksia on ymmärtää saatuja tuloksia. Erittäin huolellisesta suunnittelusta huolimatta, varsinkin kokoonpuristuvilla virtausaineilla, muuttuvia tekijöitä on niin suuri määrä, ettei niiden arviointi kannata ajallisesti tai taloudellisesti. Kun mittausjärjestelyiden huolellisesta suunnittelusta ja toteutuksesta pidetään kiinni, on loppu säätö tehtävä itse mittalaitteen kanssa. Uusissa ja kokeellisissa mittauksissa apuna voidaan käyttää samankaltaisia referenssikohteita, kuten tässä työssä on tehty, mutta referensseistä ja skaalaamisesta huolimatta virtaus voi käyttäytyä poikkeavasti. Tästä syystä virtauslaitteen kanssa tehty hienosäätö mittauksien yhteydessä on erittäin tärkeää ja hienosäädön määrää on mahdotonta arvioida pelkästään suunnitteluvaiheessa. Parhaiden mahdollisten tulosten saamiseksi on noudatettava mittausinstrumentointia ja mittausuunnittelua, mutta osattava myös lukea mittausilannetta. (Grönman, 2016)

### 4.3 Mittalaitteen sovellutukset

Lappeenrannan teknillisen yliopiston mittalaitetta suunniteltaessa on otettu huomioon useita rajoittavia tekijöitä. Rajoittavia tekijöitä ovat mm. laboratoriossa käytettävissä oleva tila, jolloin virtauskanavien pituutta täytyy rajoittaa. Myös taloudelliset rajoitteet on otettava huomioon, jolloin tiettyjä ominaisuuksia mittalaitteistosta täytyy karsia. Seuraavassa kappaleessa on käsitelty mahdollisia laajennuksia tai muutoksia

mittalaitteistoon sillä oletuksella että esimerkiksi varoja ja tilaa on huomattavasti enemmän.

#### 4.3.1 Optinen virtausmittaus

Mittalaitteiston virtausnopeusmittaukset voitaisiin toteuttaa myös käyttämällä jo aiemmin mainittua Laser Doppler –anometriä. Laser Doppler –anometriä varten virtauskaskadin kansi-, sekä pohjalevy tulisi vaihtaa läpinäkyviin. Tämän jälkeen virtaukseen tulisi syöttää valoa heijastavia partikkeleita ja kaskadiin asentaa sekä laserlähettimet että optiset ilmaisimet.

Laser Doppler –anometrin avulla pystytään mittamaan nopeuksia aina nolosta ylisoonisiin nopeuksiin asti. Lisäämällä lasereita ja ilmaisimia voitaisiin virtausnopeuksia tutkia myös kolmessa ulottuvuudessa. (Dantec Dynamics, 2008)

#### 4.3.2 Säädetävät siipikulmat

Mittalaitteistoon olisi mahdollista myös toteuttaa siipien säädetävä kohtauskulma, eli kulma jossa siipi kohtaa virtauksen. Kulmaa vaihtamalla kyettäisiin tarkastelemaan mahdollista sakkaamista, sekä virtaustilanteita monipuolisemmin. (Jouini et al., 2001) Säädetävän siipikulman toteutus vaatisi portaattoman pyörivän tason, johon siivet kiinnitettäisiin. Tasoa kääntämällä siipien kulmaa voitaisiin vaihtaa. Ongelmina tällaisessa järjestelyssä on kuitenkin kanavan virtausvastuksen säilyttäminen alhaisena, sekä monimutkaiset tiivistysmenetelmät ja kääntöalustan mekaaninen toteutus. (Grönman, 2016)

#### 4.3.3 Tilava virtauskanavisto

Virtauskanaviston suurin ongelma on tällä hetkellä tilan puute. Kanaviston pituudessa on jouduttu tekemään kompromisseja, jotka eivät välttämättä suoranaisesti vaikuta haluttuihin mittaustuloksiin, mutta poissulkevat joitain lisämittauksia. Esimerkiksi tilavuusvirran ja lämpötilan mittauksille ideaalitalanteessa olisi vapaata virtauskanavaa niin pitkä osuus, että virtaus ehtisi tasaantua täysin. Nykyisessä mallissa se ei

täydellisesti onnistu, jolloin esimerkiksi kaskadin jälkeinen tilavuusvirtamittaus täytyi jättää pois. Myös lämpötilamittauksiin tulee kiinnittää huomiota, sillä niiden sijainti ei ole täysin optimaalinen.

## 5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Mittalaitteen instrumentointi on haasteellista, sekä teoreettisesti yleensä suuntaantavaa. Vaikka instrumentointia suunniteltaessa käytettäisiin kaikkia tässäkin tutkielmassa käytettyjä metodeja, kuten mittalaitteiden ja virtauksen teorian tutkimista, sekä referenssitutkielmia, on haastavaa selvittää absoluuttinen tarkkuus mitattaessa. Mittauksiin vaikuttaa instrumentoinnin lisäksi lukuisia muita tekijöitä, kuten inhimilliset virheet, sekä tekijät joiden vaikutusta ei suunnitteluvaiheessa täysin tunnettu. Tästä syystä instrumentointi ei ole pelkästään teoreettinen työ, vaan vaatii myös usein säätämistä fyysistä laitetta koottaessa.

Käytetyn teorian tiedon ja referenssitutkielmien varassa, voidaan olla suhteellisen varmoja radial-outflow -turbiinille suunnitellun instrumentoinnin tarkkuudesta, mutta mittaajalla on silti merkitys. Radial-outflow -turbiinin mittalaite on kokonaisuudessaan tarkasti suunniteltu laite tämän tutkielman ulkopuolella, mikä osaltaan helpottaa instrumentoinnin suunnittelua. Mikäli mittaustulokset aikanaan eivät sovi yhteen teorian kanssa, eivätkä ole luotettavia, voidaan mahdollisina korjaustoimenpiteinä pitää tutkielmassa käsiteltyjä sovellutuksia mittalaitteeseen.

## LÄHDELUETTELO

Arts, T. 1990. Aero-thermal performance of a two dimensional highly loaded transonic turbine nozzle guide vane.

Backman, J. 2006.a Virtausnopeuden mittaus. [verkkodokumentti]. [Viitattu 9.11.2016.]. Saatavilla: [http://moodle.lut.fi/pluginfile.php/126618/mod\\_folder/content/0/J.%20Backman%20Virtausnopeus%202006?forcedownload=1](http://moodle.lut.fi/pluginfile.php/126618/mod_folder/content/0/J.%20Backman%20Virtausnopeus%202006?forcedownload=1)

Backman, J. 2006.b Massavirranmittaus. [verkkodokumentti]. [Viitattu 9.11.2016.]. Saatavilla: [http://moodle.lut.fi/pluginfile.php/126618/mod\\_folder/content/0/J.%20Backman%20Massavirranmittaus?forcedownload=1](http://moodle.lut.fi/pluginfile.php/126618/mod_folder/content/0/J.%20Backman%20Massavirranmittaus?forcedownload=1)

Backman, J. 2013. Epävarmuus. [verkkodokumentti]. [Viitattu 20.11.2016.]. Saatavilla: [http://moodle.lut.fi/pluginfile.php/126640/mod\\_resource/content/4/Ep%C3%A4varmuus2013.pdf](http://moodle.lut.fi/pluginfile.php/126640/mod_resource/content/4/Ep%C3%A4varmuus2013.pdf)

Benedict, R. P. 1984. Fundamentals of temperature, pressure and flow measurements. USA: John Wiley & Sons.

Dantec Dynamics, 2008. Laser Doppler Anemometry [verkkodokumentti]. [Viitattu 23.12.2016]. Saatavilla: <http://www.dantecdynamics.com/laser-doppler-anemometry>

Funazaki, K. & Sasaki, Y. & Tanuma, T. , 1997. Experimental studies on unsteady aerodynamic loss of a high-pressure turbine cascade.

Grönman, A. 2016. Radial-outflow -turbiinin mittalaitteen suunnittelu ja erilaiset instrumentoinnin toteutusmahdollisuudet. Suullinen tieto, projektiin liittyvät tapaamiset ja haastattelut.

ISO 5167-2, 2003. Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular-cross section conduits running full -. Part 2: Orifice plates.

Jouini, D. B. M. & Sjolander, S. A. 2001. Aerodynamic performance of a transonic turbine cascade at off-design conditions, Longuel, Quebec, Canada: Pratt & Whitney Canada

Muson B, Okiishi T, Huebsch W, Rothmayer A. 2013. Fluid Mechanics. Singapore: John Wiley & sons.

Perdichizzi, A. & Dosenna, V. , 1992. Incidence angle and pitch-chord effects on secondary flows downstream of a turbine cascade.

Punnonen, P. 2015a. Virtaus [verkkodokumentti]. [Viitattu 8.11.2016.]. Saatavilla: [http://moodle.lut.fi/pluginfile.php/126622/mod\\_resource/content/8/Emitt\\_L3a\\_Virtausmitt\\_2015M.pdf](http://moodle.lut.fi/pluginfile.php/126622/mod_resource/content/8/Emitt_L3a_Virtausmitt_2015M.pdf)

Punnonen, P. 2015b. Lämpötila [verkkodokumentti]. [Viitattu 8.11.2016.]. Saatavilla: [http://moodle.lut.fi/pluginfile.php/126612/mod\\_resource/content/7/Emitt\\_L2a\\_L%C3%A4mp%C3%B6tila\\_2015M.pdf](http://moodle.lut.fi/pluginfile.php/126612/mod_resource/content/7/Emitt_L2a_L%C3%A4mp%C3%B6tila_2015M.pdf)

Kuvat:

Benedict, R. P. 1984. Fundamentals of temperature, pressure and flow measurements. USA: John Wiley & Sons.

Dantec Dynamics, 2013. High temperature hot-wire probe [verkkodokumentti]. Saatavilla: <http://www.dantecdynamics.com/images/content/products-and-services/fluid-mechanics/cta/probes/High-temperature-hot-wire-probe.gif>

Efunda, 2017. Venturi flowmeter calculator [verkkodokumentti]. Saatavilla: [http://www.efunda.com/formulae/fluids/images/DP\\_Venturi\\_cal.gif](http://www.efunda.com/formulae/fluids/images/DP_Venturi_cal.gif)

Laserfocusworld, 2016. Photonics applied: optical sensing: Downhole sensing puts fiber optics to the test [verkkodokumentti]. Saatavilla: [http://www.laserfocusworld.com/content/dam/etc/medialib/new-lib/laser-focus-world/print-articles/volume-47/issue-04/43398.res/\\_jcr\\_content/renditions/pennwell.web.400.240.gif](http://www.laserfocusworld.com/content/dam/etc/medialib/new-lib/laser-focus-world/print-articles/volume-47/issue-04/43398.res/_jcr_content/renditions/pennwell.web.400.240.gif)

Nasa, 2015. Pitot-static tube [verkkodokumentti]. Saatavilla: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/Images/pitot.jpg>

Rotadata, 2016. Cobra -sondi.