



KÄÄNTEISEN BRAYTON-PROSESSIN KOELAITTEEN MITTAUSJÄRJESTEL- MÄN MODERNISOINTI

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Energiatekniikan kandidaatintyö

2022

Juho Mäkelä

Tarkastaja: Tutkijaopettaja Pekka Punnonen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Energiatekniikka

Juho Mäkelä

Käänteisen Brayton-prosessin koelaitteen mittausjärjestelmän modernisointi

Energiatekniikan kandidaatintyö

2022

41 sivua, 31 kuvaa ja 1 taulukko

Tarkastaja: Tutkijaopettaja Pekka Punnonen

Avainsanat: Käänteinen Brayton-prosessi, mittaustekniikka, virtaustekniikka

Tässä kandidaatin tutkinnon opinnäytetyössä suunnitellaan uusi mittausjärjestelmä ilmastointitekniikan laboratorion käänteisen Brayton-prosessin koelaitteelle. Työn tarkoituksena on suunnitella mittausjärjestelmä, joka tuottaa tarkemmat ja luotettavimmat tulokset, jotka ovat myös helpommin saatavissa. Koelaitteesta nykyisin tavoin tehtävät mittaukset voidaan toteuttaa paremmin käyttäen nykyaikaista mittaustekniikkaa.

Käänteinen Brayton-prosessi toimii käänteisesti ideaaliseen kaasuturbiiniprosessiin verrattuna. Laitteessa kiertävä ilma paisuu ensin turbiinissa ja sen jälkeen puristuu kompressorissa. Koelaitte toimii 5 kW sähkömoottorilla ja sen suunniteltu käyttötarkoitus on toimia lämpöpumppuna sekä ilmankuivaimena.

Työssä käydään läpi koelaitteessa mitattavat suureet ja nykyisille mittauslaitteille etsitään korvaajia johtuen nykyisten mittauslaitteiden iästä ja epätarkkuudesta. Valinta uusista mittauslaitteista tehdään perustuen mittareiden ja kiertävän aineen ominaisuuksiin, koelaitteen toiminta-arvoihin ja mittoihin sekä laitteessa kulkevan virtauksen tilaan. Mittauslaitteen tiedonkeruu uusitaan nopeammalla sekä helpommin luettavalla laitteistolla ja ohjelmistolla.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Energy Technology

Juho Mäkelä

Modernization of Reversed Brayton Cycle Measurement System

Bachelor's thesis

2022

41 pages, 31 figures and 1 table.

Examiners: Associate professor Pekka Punnonen

Keywords: Reversed Brayton cycle, measurement technology, fluid dynamics

In this bachelor's thesis a new measurement system is designed for a reversed Brayton cycle device at LUT fluid dynamics laboratory. The aim is to design a measurement system which produces accurate, reliable and easily obtained results. The old measurement system can be improved using modern technology.

Reversed Brayton cycle is an inverse of the ideal gas turbine process. The air circulating in the machine is first expanded in a turbine and then compressed by a radial compressor. The machine runs on a 5 kW electric motor and it is designed to work as a heat pump and an air dehumidifier.

Due to age and uncertainty of the old measuring system, new alternatives are looked at for measuring the wanted quantities in the process. The choice of new equipment is based on fluid and probe properties, measurement device size and process values as well as the state of the fluid flow. An easier to use and faster data acquisition system is chosen.

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset

p	paine	[Pa, bar]
q_m	massavirta	[kg/s]
T	lämpötila	[°C]
A	pinta-ala	[m ²]
d	halkaisija	[m]
z	korkeus	[m]
l	etäisyys	[m]
w	nopeus	[m/s]
c	äänen nopeus	[m/s]
u	epävarmuus	
t	aika	[s]
f	taajuus	[1/s]
C	purkauskerroin	[-]

Kreikkalaiset

α	kulma	[°]
β	halkaisijasuhde	[-]
ε	laajenemiskerroin	[-]
ρ	tiheys	[kg/m ³]
μ	dynaaminen viskositeetti	[kg/sm]

Vakiot

g putoamiskiihtyvyyys $9,81 \text{ m/s}^2$

Dimensiottomat luvut

Re Reynoldsin luku

S Strouhalin luku

Alaindeksit

1 sisäänvirtaus

2 ulosvirtaus

a keskimääräinen

Lyhenteet

RH Suhteellinen kosteus (Relative humidity)

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Symboli- ja lyhenneluettelo

1	Johdanto.....	7
2	Käänteinen Brayton-prosessi	8
3	Mittausepävarmuus	12
4	Mittauslaitteet	14
4.1	Paine.....	14
4.1.1	Seinäpäporaukset.....	14
4.1.2	Pitot-putket	16
4.2	Lämpötila.....	17
4.2.1	Termoparit.....	17
4.2.2	Vastuslämpötila-anturit.....	19
4.3	Massavirta.....	20
4.3.1	Venturiputki.....	20
4.3.2	Kuristuslaippa	23
4.3.3	V-cone.....	25
4.3.4	Ultraäänen perustuvat virtausmittarit	27
4.3.5	Vortex-mittari.....	28
4.4	Suhteellinen kosteus	30
4.4.1	Kapasitiiviset kosteusmittarit	30
4.4.2	Kastepistelämpötilamittarit.....	30
4.5	Moottorin nopeus ja teho.....	32
4.6	Poistettu vesi.....	33
5	Tiedonkeruu	34
6	Uusi mittausjärjestelmä	36
7	Yhteenveto	38
	Lähteet	39

1 Johdanto

Teknologian kehitys luo tarpeen toisinaan tarkastella vanhojen koneiden ja laitteiden käytökelpoisuutta nykyaikana. Mittaustekniikkakin muuttuu pitkällä aikavälillä paljon, jolloin käyttämällä vanhoja mittausvälineitä saatetaan luopua tarkemmista ja helpommin saatavista tuloksista. Tässä kandidaatintyössä tarkastellaan eri suureiden mittausten nykytilaa ja valitaan tarkastelun pohjalta LUT ilmastointitekniikan laboratorion käänteisen Brayton-prosessin koelaitteen mittausjärjestelmälle uudet mittausanturit ja tiedonkeruulaitteisto.

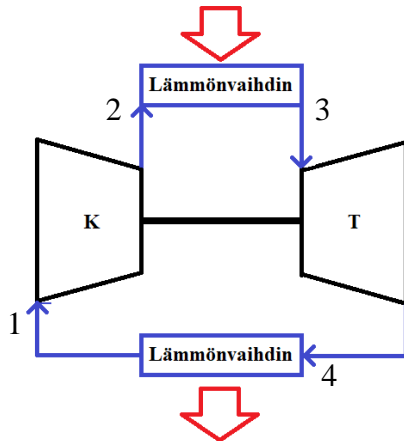
Käänteisen Brayton-prosessin koelaitte rakennettiin vuosina 1994–1995 osana laajaa suurnopeustekniikan tutkimus- ja kehitystyötä (Larjola et al. 2010, 26). Laite suunniteltiin toimimaan ilmankuivaimena sekä pohjana tuleville kaupallisille käänteistä Brayton-prosessia hyödyntäville koneille (Backman 1996, 65).

Työssä käydään läpi mitä käänteinen Brayton-prosessi tarkoittaa ja miten koelaitte ”Triple” toimii. Kaikki laitteessa mitattavat suureet ja niiden mittaamiseen nykyään käytettävät mittauslaitteet esitellään ja niitä vertaillaan uusiin mahdollisiin mittareihin. Mittauslaitteiden hyviin ja huonoihin puoliin sekä epävarmuuksiin kiinnitetään huomiota. Lopuksi valitaan mittauksissa käytettävät mittaustavat, jotka ovat sopivia virtauksen mittaukseen halutuilla prosessin toiminta-arvoilla.

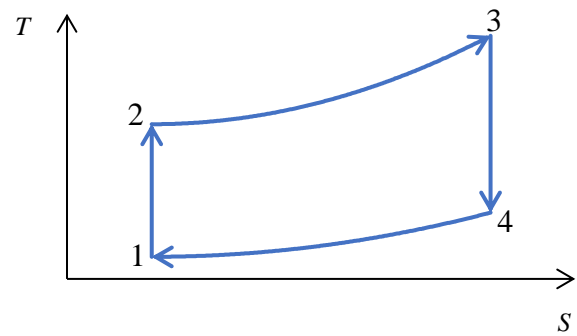
Työssä on keskitytty erityisesti lämpötilan, paineen ja massavirran mittausten parantamiseen. Tämä johtuu osittain nykyisten mittausten suuresta epätarkkuudesta ja osittain näiden suureiden merkityksestä laitteen toiminta-arvoja tarkastellessa.

2 Käänteinen Brayton-prosessi

Brayton prosessi on ideaalinen kaasuturbiiniprosessi.



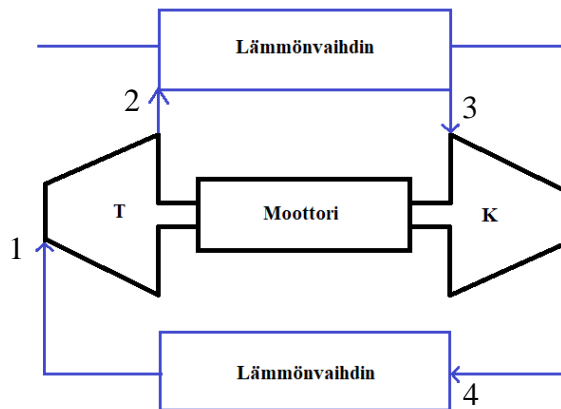
Kuva 1. Brayton-prosessikaavio



Kuva 2. Brayton-prosessin T,s -piirros

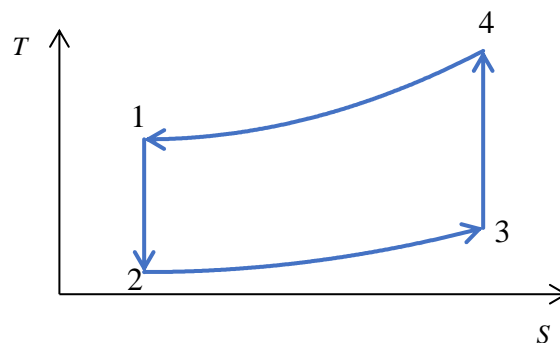
Tavallinen Brayton-prosessi voidaan esittää nelivaiheisena kuvan 1 prosessikaavion ja kuvan 2 T,s -piirroksen mukaisesti.

- 1 \rightarrow 2 Isentrooppinen puristus kompressorissa (K).
- 2 \rightarrow 3 Isobaarinen lämmöntuonti lämmönvaihtimessa.
- 3 \rightarrow 4 Isentrooppinen paisuminen turbiinissa (T).
- 4 \rightarrow 1 Isobaarinen lämmönpoisto lämmönvaihtimessa.



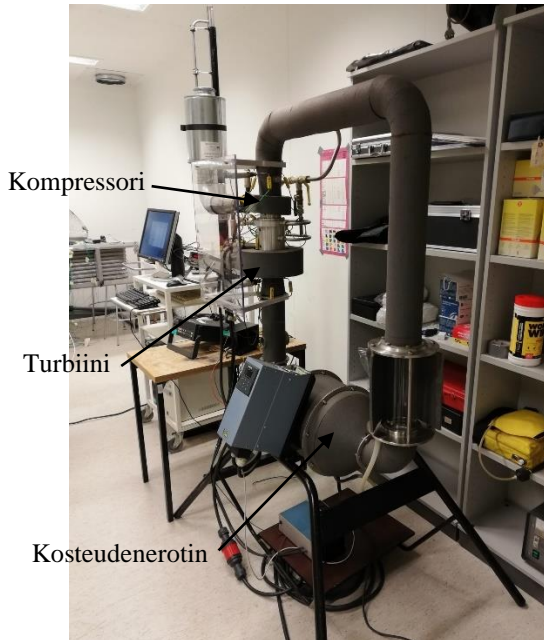
Kuva 3. Käänteisen Brayton prosessin prosessikaavio.

Kuvassa 3 on esitetty käänteinen Brayton prosessi. Käänteinen Brayton-prosessi toimii niimensä mukaisesti käänteisessä järjestyksessä verrattuna tavalliseen Brayton-prosessiin. Virtaus menee ensin turbiiniin ja sitten kompressoriin. Brayton-prosessi tekee työtä ja tuottaa sähköä polttoaineen sisältämästä energiasta turbiiniin kytketyn generaattorin avulla. Käänteisessä Brayton prosessissa ei käytetä polttokammiota eikä siinä tuoteta työtä. Prosessin ylläpitämiseksi työ tulee tuoda ulkoisesti esimerkiksi sähkömoottorilla (Backman 1996, 7). Käänteistä Brayton-prosessia voidaan käyttää esimerkiksi lämpöpumpuissa tai ilmankuivaimissa.



Kuva 4. Käänteisen Brayton-prosessin T,s -piirros.

Kuvassa 4 on käänteisen Brayton-prosessin T,s -piirros, joka on muuten samanlainen verrattuna kuvan 2 piirrokseen, mutta prosessin suunta on käänteinen.



Kuva 5. Mittauslaitteisto.



Kuva 6. Kosteudenerotin

Kuvassa 5 nähdään käänteisen Brayton-prosessin koelaitte Triple. Laitte toimii 5 kW sähkömoottorilla. Ilman puristamiseen käytetään radiaalikompressoria, jolla on melko pieni painesuhde, yleensä noin 1,2–1,5. Paine laskee turbiinissa noin 30 kPa ja sen seurauksena ilma jäähtyy. Jäähtyneen ilman sisältämä vesihöyry tiivistyy kuvan 6 kosteudenerotimessa olevaan verkkoon ja poistuu ulos laitteesta. Sähkömoottori on laakeroitu kaasulaakereilla sekä magneettisilla laakereilla ja sitä jäähdytetään laboratoriotilasta otettavalla ilmalla, mikä lämmentyyään imetään kompressorilla moottorista pois.

Taulukko 1. Triplen suunnitellut toiminta-arvot.

	T [°C]	p [kPa]	q_m [kg/s]
Prosessin alussa	25,0	100,0	0,064
Ennen turbiinia	25,0	99,7	0,064
Turbiinin jälkeen	8,1	64,2	0,064
Kosteudenerottimen jälkeen	8,1	63,2	0,064
Kompressorin jälkeen	63,1	100,4	0,064
Prosessin lopussa	63,1	100,0	0,064

Taulukossa 1 on esitetty Triplen suunniteltuja toiminta-arvoja, kun moottorin pyörimisnopeus on 84700 rpm ja syötetty sähköteho 2,28 kW (Backman 1996, 66). Dimensioton Reynoldsin luku kertoo, onko virtaus tasaista ja koossa pysyvää laminaaria vai pyörteistä turbulencia. Reynoldsin luku lasketaan putkivirtaukselle yhtälöllä

$$\text{Re} = \frac{4q_m}{\pi D \mu} \quad (1)$$

missä D on putken halkaisija [m], q_m on massavirta ja μ on fluidin dynaaminen viskositeetti [kg/sm]. Ilman viskositeetti oletetaan olevan mittausten aikana $184,6 \cdot 10^{-7}$ kg/sm (Cengel, Cimbala 2006, 894). Virtauskanavan halkaisija vaihtelee välillä 35–84 mm. Putkivirtaus katsotaan laminaariseksi, kun Reynoldsin luku on enintään 2300 (Fox, McDonald 1992, 339). Reynoldsin luku Triplessä, taulukon 1 arvoilla, on alueella $5 \cdot 10^4 - 1,3 \cdot 10^5$. Virtaus on siis koko prosessin ajan selvästi turbulencia.

3 Mittausepävarmuus

Mittausepävarmuus kertoo, kuinka varmoja tehtyjen mittausten tuloksista ollaan (Bell 2001, 1). Kun mittausepävarmuus tunnetaan, voidaan tehdä arvioita tehtyjen mittausten laadusta ja tulokset ymmärretään paremmin. Epävarmuuksien lähteet tulee tunnistaa ja listata, jotta niistä voidaan päästä eroon ja saadaan luotettavimmat tulokset. Mittalaitteista aiheutuva epävarmuus voi johtua muun muassa kalibroinnista tai mittarin vääränlaisesta käytöstä.

Mittausepävarmuus voidaan luokitella A- ja B-tyypin epävarmuuksiin. A-tyypin epävarmuutta arvioidaan tilastollisin menetelmin esimerkiksi toistamalla sama mittaus monta kertaa ja laskemalla epävarmuus tulosten perusteella. Tyypin A epävarmuus voidaan määrittää yhtälöllä

$$u_A(\bar{q}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})^2}{n(n-1)}} \quad (2)$$

Missä q_i on mittaustulos i , \bar{q} on mittausten keskiarvo ja n on mittausten lukumäärä. (Weckström 2002, 12)

B-tyypin epävarmuutta ei määritellä tilastollisin menetelmin, vaan esimerkiksi mittauslaitteen valmistajan antamien resoluutiotietojen avulla yhtälön 3 mukaan

$$u_B = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (3)$$

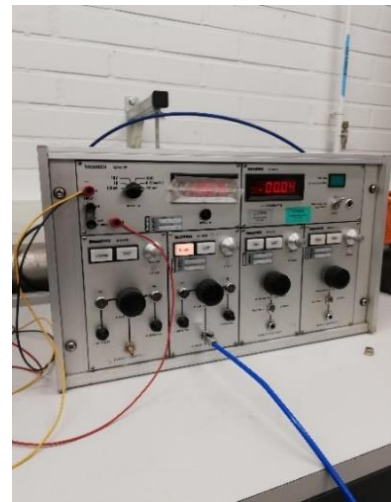
missä a on oletus tasajakaumasta (Weckström 2002, 15). A- ja B-tyypin epävarmuudet voidaan myös yhdistää ja yleensä laajentaa jollekin todennäköisyysalueelle. Todennäköisyysalue kertoo, millä todennäköisyydellä epävarmuus on oikein. Tässä työssä tarkasteltavien

mittauslaitteiden epävarmuudet ovat B-tyyppiä, sillä niiden suuruuden arviointiin käytetään valmistajien antamia tietoja ja standardeja.

Mittausepävarmuuden minimoimiseksi tulee pitää huolta mittauslaitteiden kalibroinnista. Jotkut mittarit vaativat kalibrointia useammin kuin muut ja jos kalibrointi jätetään tekemättä saattaa mittausvirhe kasvaa pitkällä aikavälillä moninkertaiseksi.



Kuva 7. Lämpötilakalibraattori.



Kuva 8. Painekalibraattori.

Kuvassa 7 on Beamexin valmistama termoelementtien kalibroimiseen käytettävä kalibrointilaite, jonka vakiona pysyvään, tunnettuun lämpötilaan termoelementtien lämpötilaa verrataan. Termoelementit saattavat olla hyvin epätarkkoja, mutta kalibroinnin jälkeen mittausepävarmuus saadaan hyvin pieneksi. Kuvassa 8 on Beamexin valmistama painekalibraattori, joka vertaa tunnettua painetta käytetyn painemittarin lähettämään paineeseen.

4 Mittauslaitteet

Koelaitteella mitataan seitsemää suuretta, joitakin useissa eri kohdissa. Mitattavat suureet ovat paine, lämpötila, massavirta, suhteellinen kosteus, moottorin teho ja pyörimisnopeus sekä systeemistä poistuvan veden massa. Tässä kappaleessa arvioidaan suureiden mittaamiseen käytettyjä mittauslaitteita ja niiden mahdollisia korvaajia.

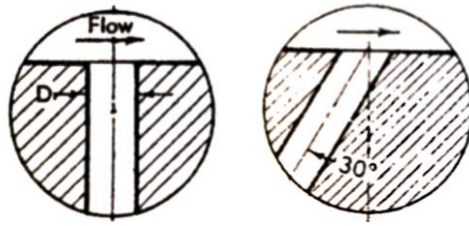
4.1 Paine

Triplessä käytetään painetta muuttavia kompressoria ja turbiinia, joiden takia paineen mittaaminen on tärkeää toteuttaa useassa kohdassa prosessissa. Kompressorin ja turbiinin painemuutosten, eli painesuhteiden avulla voidaan esimerkiksi laskea isentrooppiset loppulämpötilat puristukselle ja paisunnalle.

4.1.1 Seinämäporaukset

Paineen mittaus on toteutettu laitteessa kahdella tavalla. Osassa mittauspisteitä on porattu kolme reikää kohtisuoraan virtausta 120 asteen välein toisiinsa nähden. Reiät on yhdistetty letkulla, jonka kautta paine mitataan. Turbiinin jälkeinen paine on mitattu kahdesta 70 asteen kulmassa virtausta vastaan olevasta seinämäporauksesta.

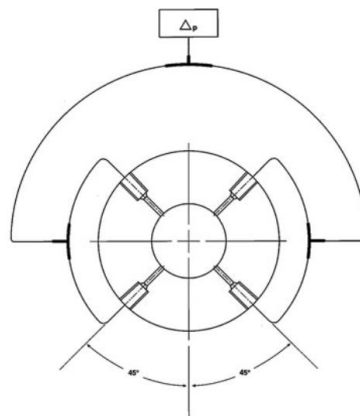
Seinämäporaukset ovat yleinen tapa mitata staattista painetta. Virtauskanavan seinään porataan pienet, teräväreunaiset reiät, joiden kautta virtauksen paine mitataan. Porauksessa tulee olla tarkkana, sillä pienetkin virheet voivat vaikuttaa merkittävästi mittaukseen (Hayward 1977, 164).



Kuva 9. Seinämäporauksia (Arts et al. 2001, 47).

Alle 0,5 mm halkaisijan reikiä ei kannata käyttää mittaustulosten viiveen ja reikien liian helpon tukkiutumisen takia. Liian suuret reiät aiheuttavat muutoksia virtaukseen ja ovat siksi epätarkkoja. Parhaat tulokset saadaan kuvan 9 mukaisilla kohtisuorilla ja virtauksen myötäisillä porauksilla, joita ei ole pyöristetty. (Arts et al. 2001, 45.)

Yksittäisten seinämäporausten ja mittauspisteen pienten paine-erojen aiheuttamien mittausrvirheiden minimoimiseksi paine tulee mitata monesta kohtaa. Reiät yhdistetään renkaalla, jolloin saadaan yksi syöte painelähttimelle ja tiedonkeruulaitteelle.



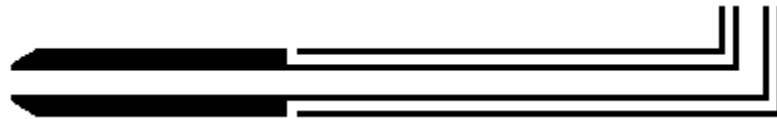
Kuva 10. Triple-T rengas (Reader-Harris 2015, 109)

Kuvan 10 mukainen Triple-T kytkentä on todettu parhaaksi tavaksi yhdistää poratut reiät (Reader-Harris 2015, 109). Paineen mittaukseen tarvittavien antureiden tai seinämäporausten lisäksi tulee käyttää painelähetintä, joka havaitsee mittarin tunteman paineen ja lähettää

sen suuruuden perusteella virtaa tiedonkeruulaitteistolle. Monen paineanturin toiminta perustuu materiaalin muodon muutokseen, jonka aiheuttaa paineen vaikutus pintaan. Pietsoresistiivisissä paineantureissa on puolijohdevenymäliuskat, joiden resistanssi muuttuu liuskan venyessä. Pietsoresistiivisten venymäliuskojen herkkyys on jopa 50–100 kertaa suurempi kuin tavallisilla metallisilla venymäliuskoilla (Halko et al. 1998, 69). Esimerkiksi Druck:n valmistamilla puolijohdeliuskoja käyttävillä painelähettimillä voidaan mitata painetta välillä 70 mbar...700 bar 0,04 % tarkkuudella (Druck 2019, 1).

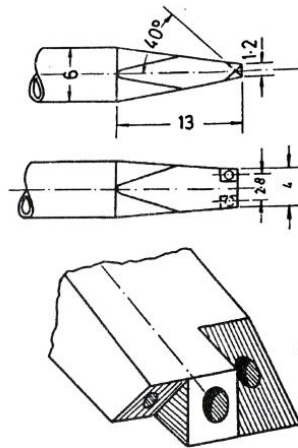
4.1.2 Pitot-putket

Painetta voidaan mitata myös vastavirtaan asetettavalla pitot-staattisella putkella.



Kuva 11. Pitot-staattinen putki

Kuvan 11 putken kärjessä on reikä, jonka kautta mitataan kokonaispaine putken ollessa vastakkain virtauksen kanssa. Putken sivuilla on reikiä kohtisuoraan virtausta, joiden kautta mitataan staattista painetta. Kokonaispaine koostuu staattisesta paineesta ja dynaamisesta paineesta. Tyypillisen tarkan pitot-putken epävarmuus on noin ± 1 % (Omega engineering, 1). Virtauksen tilan määrittämiseen saatetaan tarvita virtauksen nopeuden lisäksi tietoa myös virtauksen suunnasta. Virtauksen suunnan määrittäminen on tärkeä osa staattisen ja kokonaispaineen mittauksia.



Kuva 12. 3 Bore Probe (Arts et al. 2001, 74)

Kuvan 12 anturissa on virtausta kohti eri suuntiin porattuja reikiä. Oikeanlaisilla antureilla voidaan mitata sekä nopeutta että suuntaa. Tällaiset anturit myös auttavat staattisen paineen mittausta helpottamalla anturin oikein tehtyä kohdistamista (Arts et al. 2001, 71).

4.2 Lämpötila

Lämpötila on hyvin yleinen mitattava suure. Kun lämpötilaa mitataan prosessin eri vaiheissa, voidaan laskea esimerkiksi kompressorin ja turbiinin tehot sekä isentrooppihyötysuhteet. Lämpötilan mittauksen on oltava Triplessä mahdollisimman tarkkaa, sillä esimerkiksi kompressorin tehon laskemiseen tarvitaan lämpötilan muutosta kompressorissa, mikä ei ole suuri. Pienikin virhe lämpötilan mittauksessa voi aiheuttaa tehon laskussa suuren virheen. Lämpötilaa mitatessa on kannattavaa käyttää neljää anturia kussakin mittauspisteessä, jotta saadaan mahdollisimman tarkka keskilämpötila. Lämpötilaa mitataan ennen ja jälkeen turbiinin sekä ennen ja jälkeen kompressorin. Antureita tarvitaan siis yhteensä 16 kappaletta.

4.2.1 Termoparit

Lämpötilan mittaus on toteutettu termoelementeillä, joiden toiminta perustuu Seebeck-ilmiöön. Termoelementissä kaksi eri metalleista valmistettua lankaa yhdistetään toisesta päästä

ja toisesta päästä jätetään avoimeksi. Johtuen metallien ominaisuuksista ja päiden välisestä lämpötilaerosta, syntyy lankojen avoimiin päihin pieni jännite-ero, joka voidaan mitata. (Weckström 2002, 26). Lämpötilan mittaamiseen käytetyssä K-tyyppin termoelementissä on metallilangoissa käytetty nikkelikromia ja nikkelialumiinia.

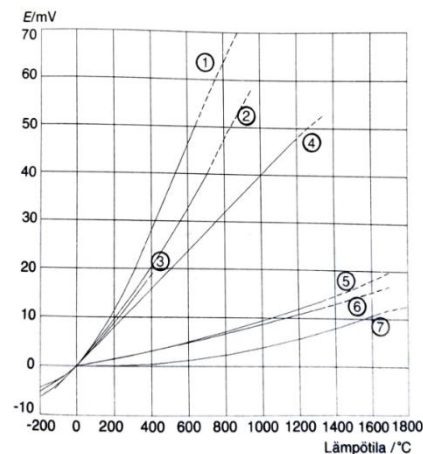


Kuva 13. Termoelementin vertailuliitos.



Kuva 14. K-tyyppin termoelementti.

Kuvassa 13 on termoelementin vertailuliitos, jossa mitataan eri lankojen välinen jännite-ero ja kuvassa 14 on termoelementin mitattavaan tilaan laitettava anturin pää.



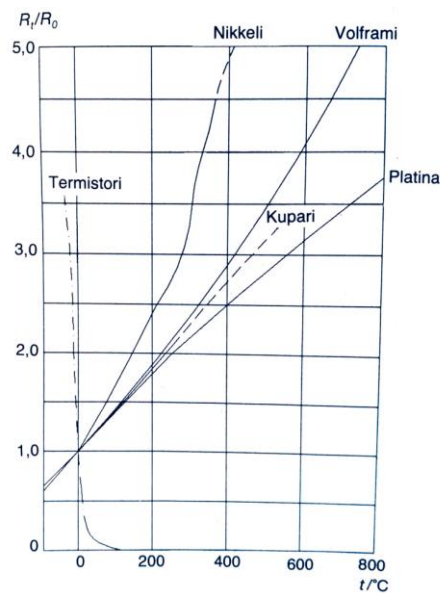
Kuva 15. Termoelementtien termojännitteet lämpötilan suhteen. (Halko et al. 1998, 43)

Kuvassa 15 suora numero 4 on K-tyyppin termoelementin. K-tyyppin termoelementti soveltuu käytettäväksi lämpötila-alueella $-200\text{ °C} - 1300\text{ °C}$, kunhan ympäristö on riittävän happipitoinen (Halko et al. 1998, 43). Halvan hintansa, yksinkertaisuutensa ja laajan toiminta-alueen takia K-tyyppin termoelementit ovat yleinen valinta lämpötilan mittauksiin. Myös T-

tyypin termoelementti voisi sopia mittauksiin. T-tyyppin termoelementin termojännitteen lämpötilariippuvuus nähdään suorasta numero 3 kuvassa 15. T-tyyppin termoelementti sopii hyvin matalien lämpötilojen mittauksiin kosteassa ilmassa johtuen siinä käytettyjen materiaalien, kuparin ja konstantaanin ruostumattomuudesta (Halko et al. 1998, 43). Termoelementit voidaan kalibroida melko tarkasti, mutta epävarmuus voi vaihdella välillä $0,5 \dots 5 \text{ } ^\circ\text{C}$ (RS components 2021, 3).

4.2.2 Vastuslämpötila-anturit

Lämpötilan mittaukseen voidaan käyttää vastuslämpötila-anturia. Näiden anturien toiminta perustuu metallien resistanssin vaihteluun lämpötilan muuttuessa.



Kuva 16. Yleisten vastusanturien vastusten lämpötilariippuvuudet (Halko et al. 1998, 36)

Platina on yleinen vastuslämpötila-antureissa käytetty metalli. Kuvassa 16 platinan vastuksen lämpötilariippuvuus on lähes suora, mikä kertoo platinan stabiiliudesta. Platina sopii mittauksiin lämpötila-alueella $-250 \dots 850 \text{ } ^\circ\text{C}$ ja hyvän muovautuvuutensa ansiosta sitä pystytään käyttämään erilaisissa tiloissa ja mittaustilanteissa (Halko et al. 1998, 36). Platinasta valmistetulla vastuslämpötila-anturilla voidaan helposti saada noin $\pm 0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$ epävarmuus, eli

ne ovat termopareja tarkempia, mutta myös kalliimpia ja ne hajoavat helpommin (Hayward 1977, 170).

4.3 Massavirta

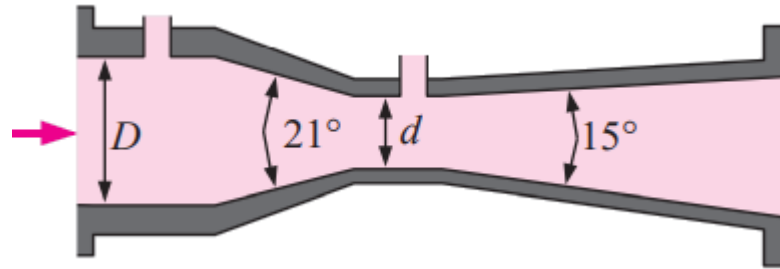
Massavirta on yksi tärkeimmistä virtaustekniikan mittauksista. Massavirtaa tarvitaan esimerkiksi kompressorin ja turbiinin tehon tehojen laskemiseen sekä virtauksen tilan määrittämiseen.

4.3.1 Venturiputki

Laitteen sisään- ja ulostuloissa virtausta mitataan venturiputkilla. Venturiputki on paineroihin perustuva mittauslaite, joka toimii Bernoullin lain mukaisesti. Bernoullin lain mukaan suljetun putken virtauksessa kokonaisenergia pysyy ajan suhteen vakiona, jos siihen ei tuoda ulkoista työtä tai lämpöä. Bernoullin yhtälö on

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho w_1^2 + \rho g z_1 = p_2 + \frac{1}{2}\rho w_2^2 + \rho g z_2 \quad (4)$$

missä p on virtaavan aineen paine [Pa], ρ on virtaavan aineen tiheys [kg/m^3], w on virtauksen nopeus mittauspisteessä [m/s], g on putoamiskiihtyvyys [m^2/s], ja z on mittauspisteen korkeus mitattuna referenssitasosta [m]. Bernoullin yhtälö toimii, jos virtaavan aineen tiheys pysyy vakiona. Virtauksen tiheyden voidaan katsoa pysyvän vakiona, kun Machin luku, eli virtauksen nopeus suhteessa äänen nopeuteen, on alle 0,3 (Fox, McDonald 1992, 37). Tripplen virtausnopeudet eivät ylitä tätä Machin lukua.



Kuva 17. Venturiputki. (Cengel, Cimbala 2006, 367)

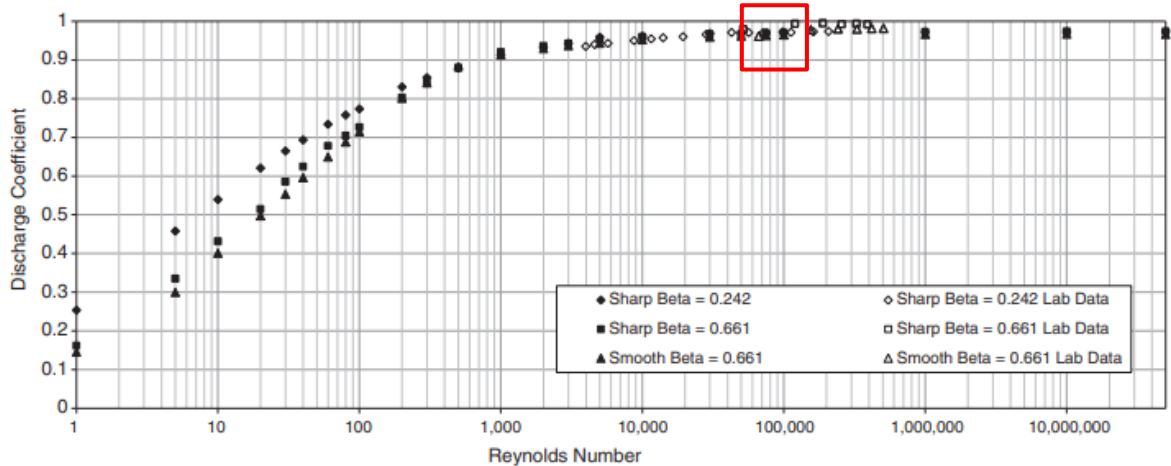
Kuvassa 17 olevasta venturiputkesta nähdään, että putken halkaisija pienenee mittarin keskellä. Putken kuristaminen aiheuttaa paineen putoamisen ja siten Bernoullin yhtälön mukaisesti virtausnopeuden on kasvettava. Massavirran suhde virtausnopeuteen on

$$q_m = \rho w A \quad (5)$$

missä A on venturiputken halkaisija mittauspisteessä [m^2]. Massavirta voidaan laskea suoraan ISO 5167 -standardin mukaan

$$q_m = C \cdot \frac{1}{\sqrt{1-\beta^4}} \varepsilon \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2\Delta p \rho_1} \quad (6)$$

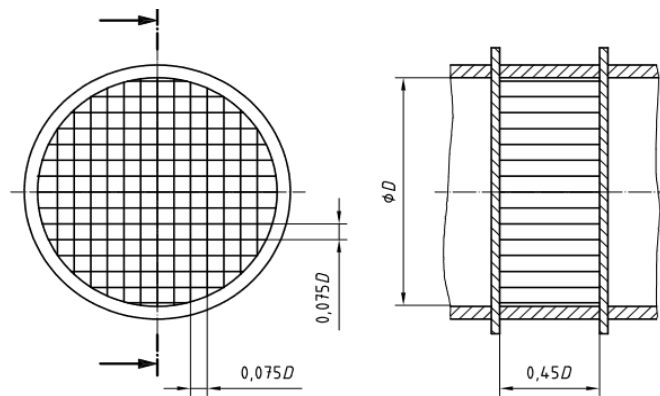
missä C on purkauskerroin [-], β on putken ja kuristuksen halkaisijoiden suhde [-] ja ε on laajenemiskerroin [-]. Halkaisijana käytetään kuristuksen halkaisijaa (SFS 2003). Kokoonpuristumattomalle fluidille laajenemiskerroin on yksi (Reader-Harris 2015, 6) ja purkauskerroin on laskettavissa Reynoldsin luvun sekä putken ja kuristuksen halkaisijoiden avulla.



Kuva 18. Venturiputken purkauskertoimia (Hollingshead et al. 2011, 561)

Kuvassa 18 on purkauskertoimia β :n eri arvoilla. Nähdään, että venturiputkella kertoimet ovat Triplen Reynoldsin luvuilla $5 \cdot 10^4 - 1,3 \cdot 10^5$, punaisella neliöllä merkityllä alueella, lähellä yhtä. Venturiputki on SFS ISO 5167 -standardin mukainen mittaustilaite, jonka ohjeita seuraamalla tulisi päästä standardien mukaiseen mittaustarkkuuteen. Putken halkaisijan tulee SFS ISO 5167 standardin (2003) mukaan olla yli 50 mm ja Reynoldsin luvun yli $2 \cdot 10^5$. Massavirran mittauksen epävarmuuden arvioidaan standardeista poikkeavissa olosuhteissa olevan nykyisessä laitteessa noin $\pm 2\%$ (Backman 1996, 76).

Paine-eroon perustuvien virtausmittareiden tarkkuuteen vaikuttaa yleensä merkittävästi erilaiset esteet tai suunnanmuutokset virtauksessa ennen mittaria. ISO 5167 -standardi kertoo, kuinka pitkä matka vapaata virtauskanavaa tulee jättää mutkien tai venttiilien jälkeen ennen mittausta. Vaadittuun etäisyyteen vaikuttaa mittarin tyyppi lisäksi halkaisijasuhde β , virtausesteen tyyppi ja haluttu epävarmuus. Mitä pienempi β :n arvo on, sitä lyhyempi etäisyys. Tarvittavaa suoraa voidaan lyhentää tarvittaessa virtauksen tasaajilla, jotka vähentävät virtauksen pyörteisyyttä. Kuvassa 19 on standardissa ISO 5167 esitetty virtauksentasain.



Kuva 19. Virtauksen tasaaja. (SFS 2003)

Venturiputkella vaadittu etäisyys virtausesteen jälkeen on ISO 5167 -standardin (2003) mukaan yleensä 3–6 kertaa putken halkaisija riippumatta virtausesteen tyypistä tai halkaisijasuhteesta, jos halutaan virtausesteen aiheuttaman epävarmuuden lisäyksen olevan 0,5 %. Jos virtausesteen vaikutus mittausepävarmuudessa halutaan poistaa kokonaan, tulee etäisyyden olla 2–4 kertaa pidempi kuin 0,5 % virheellä. Venturiputkea käytettäessä tulee verrattain pienien turvaetäisyyksien lisäksi kuitenkin huomioida myös laitteen pituus.

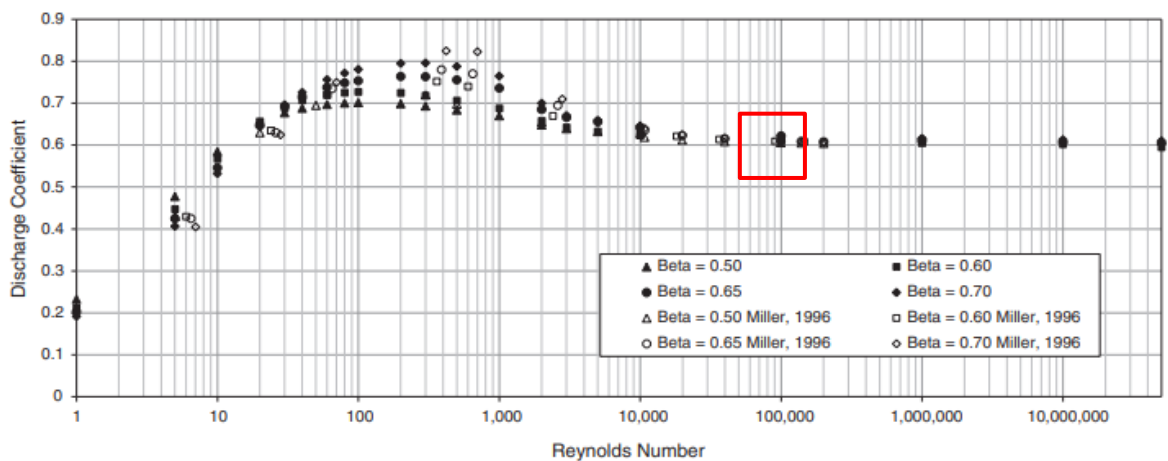
4.3.2 Kuristuslaippa

Kuristuslaippa on venturiputken tapaan paine-eroon perustuva virtausmittari. Kuristuslaippa on metallinen levy, jonka keskelle on yleensä tehty yksi teräväreunainen reikä. Reikiä voi olla useampia eri paikoissa levyä, mutta keskellä olevalla reiällä saadaan pienin epävarmuus (Reader-Harris 2015, 33).



Kuva 20. Kurustuslaippa

Kuvassa 20 on kurustuslaippa, josta näkyy laipan ulostulon pyörästetty reuna. Kurustuslaippa on myös SFS ISO 5167 -standardin mukainen virtausmittari ja sen aiheuttaman paine-eron avulla voidaan massavirta laskea venturiputken tapaan käyttäen yhtälöä 6.



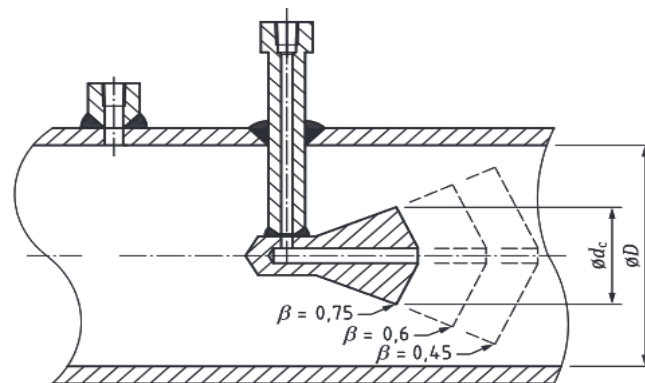
Kuva 21. Kurustuslaipan purkauskertoimia. (Hollingshead et al. 2011, 562)

Kuvassa 21 on purkauskertoimia β :n eri arvoille Reynoldsin luvun funktiona. Punaisella neliöllä on merkitty Triplen toiminta-alue. Purkauskertoimen arvo lähestyy arvoa 0,6 lähestyttäessä korkeampia Reynoldsin lukuja. Kurustuslaippa tarvitsee venturiputken tavoin, halkaisijasuhteesta ja virtausesteen tyypistä riippuen, paljon suoraa putkea ennen mittausta. Standardin ISO 5167 (2003) mukaan etäisyys virtausesteeseen tulee yleensä olla 5–20 kertaa

putken halkaisija, jos halutaan epätarkkuudeksi 0,5 % ilman virtauksen tasaajaa. Jos epävarmuus halutaan virtausesteiden osalta poistaa, tulee vapaata virtauskanavaa olla yleensä 10–44 kertaa putken halkaisija. Pienillä esteillä saatetaan tarvita vain 3 kertaa putken halkaisija, mutta standardin mukaan etäisyydeksi voidaan 90 asteen mutkilla vaatia jopa 75 kertaa putken halkaisija. Ottaen huomioon Triplen putkien lyhyen pituuden massavirran mittausten kohdalla kuristuslaippaa on lähes mahdotonta saada mahtumaan, vaikka käytettäisiin virtauksen tasaajaa, jos halutaan pitää epävarmuus ja koelaitteen koko järkevässä kokoluokassa.

4.3.3 V-cone

V-cone on kartiomainen laajeneva paine-eroon perustuva virtausmittari, joka asetetaan virtauskanavan keskelle.



Kuva 22. V-cone virtausmittari. (SFS 2016)

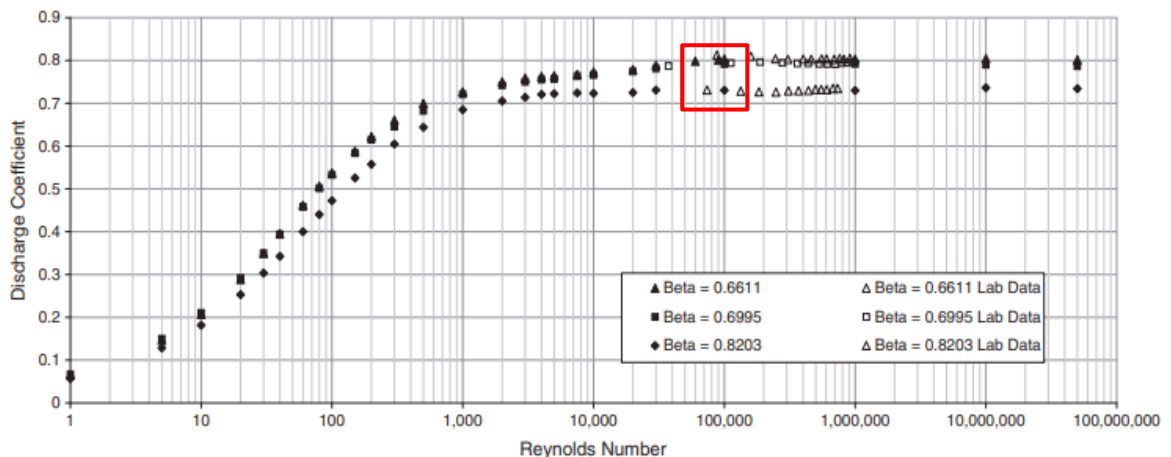
Kuvassa 22 on V-cone mittari asetettuna virtauskanavaan. Paine mitataan hieman ennen virtauksen osumista anturiin ja paineen laskettua anturin päästä. V-conessa virtaus pakotetaan putken reunoille toisin kuin venturiputkessa ja kuristuslaipassa, joissa virtaus ohjataan pois reunoilta. Lähestyttäessä virtausprofiilissa putken reunaa, virtaus hidastuu ja tasoittuu. V-cone tekee siis virtauksesta tasaisempaa.

V-cone on myös osa ISO 5167 -standardia, mutta sen massavirran laskeminen eroaa hieman venturiputkesta ja kuristuslaipasta. V-conen paine-erolla laskettu massavirta on

$$q_m = \frac{c}{\sqrt{1-\beta^4}} \varepsilon \frac{\pi}{4} (D\beta)^2 \sqrt{2\Delta p \rho_1} \quad (7)$$

Myös putken ja mittauslaitteen halkaisijoiden suhde lasketaan eri tavalla

$$\beta = \sqrt{1 - \frac{d_c^2}{D^2}} \quad (8)$$

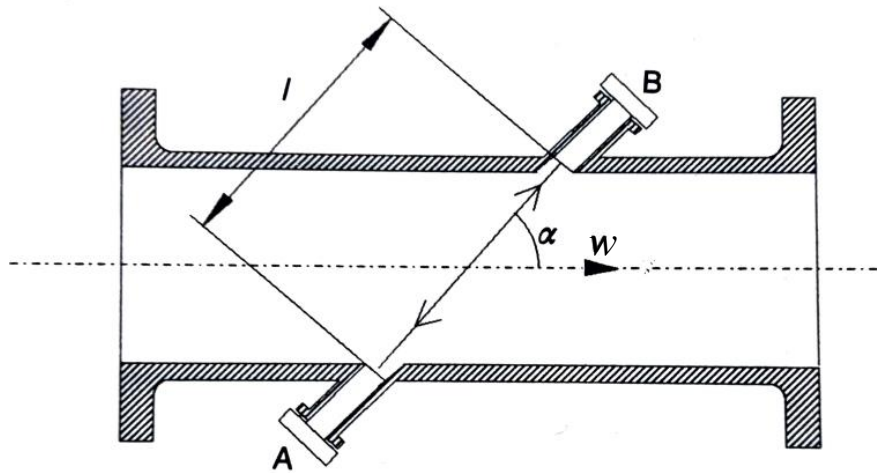


Kuva 23. V-conen purkauskertoimia (Hollingshead et al. 2011, 562)

Kuvasta 23 nähdään, että V-conen purkauskertoimet Triplessä, punaisen neliön alueella, ovat hieman venturiputkea pienemmät. V-conen aiheuttaman virtauksen tasaamisen takia mittarin jälkeen tai sitä ennen ei tarvitse olla paljoa esteetöntä putkea. Erillistä virtauksen tasaajaa ei myöskään ole monesti tarpeen käyttää. ISO 5167 -standardin (2016) mukaan ennen virtausta tarvitaan yleensä noin 3 kertaa putken halkaisijan verran tilaa. Kaksi kertaa halkaisijan etäisyyden päässä mittarin jälkeen olevat esteet eivät enää vaikuta mittausepävarmuuteen. V-conea käyttämällä säästetään siis huomattavan paljon tilaa.

4.3.4 Ultraääneen perustuvat virtausmittarit

Ultraääni on ääntä, jonka taajuus on ihmisen kuuloaluetta korkeammalla. Virtauskanavaan voidaan asettaa kaksi lähetintä, joista virtausaineen liikkeestä johtuen toinen lähettää ääntä myötävirtaan ja toinen vastavirtaan.



Kuva 24. Ultraääntä hyödyntävä virtausmittari. (Halko et al. 1998, 109)

Kuvan 24 putkeen on asennettu ultraääntä lähettävät ja vastaanottavat muuntimet A ja B. Virtauksen suunnasta ja etenemisnopeudesta riippuen, ultraääni etenee välillä AB nopeudella

$$w_{AB} = c + w_a \cos \alpha \quad (9)$$

missä c on ultraäänen nopeus paikallaan olevassa väliaineessa [m/s], w_a on fluidin keskimääräinen virtausnopeus [m/s] ja α on ultraäänen ja virtaussuunnan välinen kulma. Välillä BA ultraäänen nopeus on vastaavasti

$$w_{BA} = c - w_a \cos \alpha \quad (10)$$

Kun tiedetään A ja B välinen etäisyys l , voidaan ratkaista äänen matkoihin AB ja BA käyttämät ajat.

$$t = \frac{l}{w_a} \quad (11)$$

Fluidin keskimääräinen virtausnopeus voidaan laskea käyttämällä välin AB ja BA kulkemiseen kuluneiden aikojen eroa, jolloin saadaan yhtälö

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{l}{c - w_a \cos \alpha} - \frac{l}{c + w_a \cos \alpha} = \frac{2lw_a \cos \alpha}{c^2 - w_a^2 \cos^2 \alpha} \quad (12)$$

Voidaan olettaa, että $c > w_a$, jolloin $c^2 \gg w_a^2 \cos^2 \alpha$. Fluidin keskimääräisen virtausnopeuden lasku saadaan nyt yksinkertaistettua muotoon

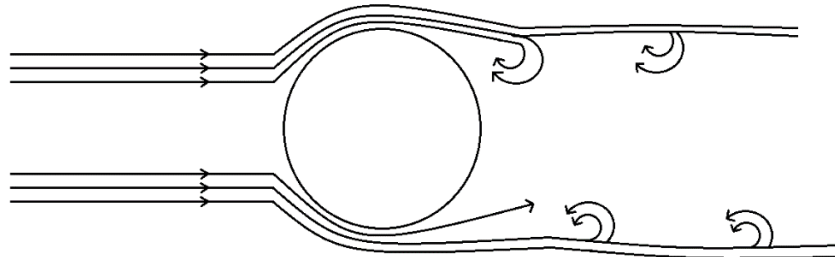
$$w_a = \frac{c^2 \Delta t}{2l \cos \alpha} \quad (13)$$

Ultraäänivirtausmittarit sopivat hyvin aineille, joissa ääni pääsee kulkemaan vaimentuen mahdollisimman vähän. Hyvänä puolena voidaan pitää myös sitä, ettei lähettämiä varten tarvitse välttämättä tehdä reikiä virtauskanavaan, vaan asennus voidaan tehdä sen ulkoseinälle. Ultraäänivirtausmittarit eivät yleensä ole tarkkoja, jos virtauksen nopeus ylittää 40 m/s.

4.3.5 Vortex-mittari

Kun putkessa kulkeva virtaus törmää johonkin kiinteään kappaleeseen, virtaukseen syntyy kappaleen jälkeen pyörteitä, jos virtausnopeus on riittävän suuri (Halko et al. 1998, 113). Syntynyttä pyörrevanaa kutsutaan von Kármánin pyörreeradaksi, missä Kármánin pyörteiden

syntymistaajuus on suoraan verrannollinen virtausnopeuteen. Mitä nopeammin virtaava aine kulkee, sitä nopeammin syntyy uusia pyörteitä.



Kuva 25. Von Kármánin pyörrerata

Pyörteiden syntymisen taajuuden ja virtausnopeuden välistä suhdetta voidaan tarkastella dimensiottomalla Strouhalin luvulla, joka lasketaan kuvan 25 kappaleelle yhtälöllä

$$S = \frac{fd}{w} \quad (14)$$

$$\rightarrow f = \frac{S}{d} w$$

missä f on pyörteiden syntymistaajuus [1/s] ja d on kappaleen halkaisija [m]. Strouhalin luku vaihtelee Reynoldsin luvun funktiona riippuen kappaleen mallista. Erilaisilla kappaleilla on eri Reynoldsin luvun alueet, missä pyörteiden syntyminen on säännöllistä, esimerkiksi kuvassa 18 olevalla poikkileikkaukseltaan ympyränmuotoisella virtausesteellä Reynoldsin luvun ollessa $300-3 \cdot 10^5$ (Halko et al. 1998, 113). Virtausmittarin sisällä on pyörteiden aiheuttaman paineen muutoksen havaitseva anturi, joka mittaa pyörteiden syntymisen taajuuden.

Vortex-mittareiden huonoja puolia on virtaukseen asetettavan kappaleen aiheuttama painehäviö. Mittausten tarkkuuteen vaikuttaa merkittävästi häiriöt virtauksessa ennen mittaria, kuten mutkat putkessa tai muut mittauslaitteet. Vortex-mittareissa ei kuitenkaan ole

liikkuvia, helposti hajoavia osia ja niiden kalibrointi on helppoa johtuen hyvin arvattavasta toiminnasta. Vortex-mittareilla on laaja mittausalue ja mittauksilla on hyvä toistettavuus. (Hayward 1979, 80.)

4.4 Suhteellinen kosteus

Suhteellisella kosteudella tarkoitetaan kaasun todellisuudessa sisältämän vesihöyryn määrää suhteessa kaasuun missä olisi suurin mahdollinen määrä vesihöyryä (Lewis 2020, 54). Eräs käänteisen Brayton-prosessin mahdollisista käyttötarkoituksista on ilmankuivain. Triplessä ilma paisuu ja jäähtyy turbiinissa, minkä seurauksena ilman seassa oleva vesihöyry tiivistyy kosteudenerottimessa ja poistuu laitteesta. Ilman sisältämän kosteuden mittaus on tärkeää tarkastellessa laitteen toiminnan tehokkuutta ilmankuivaimena.

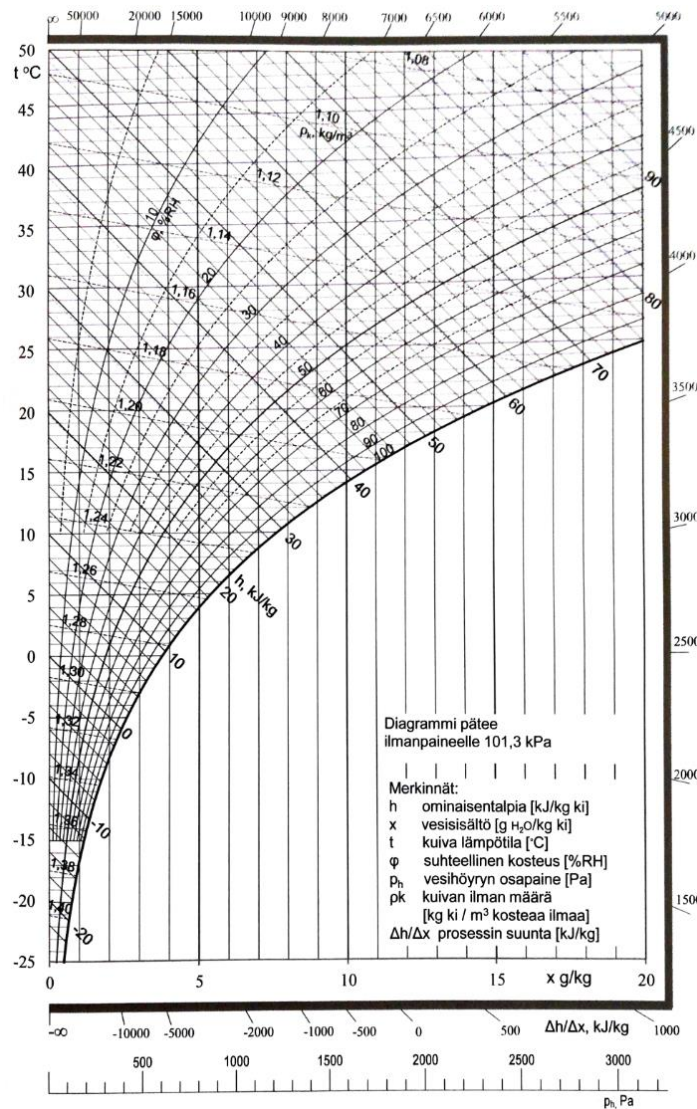
4.4.1 Kapasitiiviset kosteusmittarit

Koelaitteessa käytetään suhteellisen kosteuden mittaamiseen Vaisalan HUMICAP -anturia. Anturin toiminta perustuu teknologiaan, jossa kahden elektrodin väliin laitetaan ohut polymerikalvo, minkä eristeominaisuudet muuttuvat ilmankosteuden muuttuessa. Tämä aiheuttaa muutoksen anturin kapasitanssissa, joka voidaan mitata ilmankosteuden selvittämiseksi (Vaisala 2021). HUMICAP-anturit ovat kestäviä ja pysyvät kauan stabiileina sekä niiden tarkkuudeksi on annettu oikein mitattuna 0,8 % RH (Vaisala 2020, 1). Jos anturin kokeman ja mitattavan kohteen lämpötilat eroavat toisistaan, mittausvirhe kasvaa nopeasti hyvin suureksi. Normaalisissa sisäilman lämpötilassa ja ilmankosteudessa vain yhden asteen lämpötilaero voi aiheuttaa 3 % mittausvirheen suhteellisessa kosteudessa (Vaisala 1991, 7).

4.4.2 Kastepistelämpötilamittarit

Ilmassa olevalla vesihöyryllä on jokin lämpötila, missä se alkaa tiivistyä nesteeksi. Tätä lämpötilaa kutsutaan kastepistelämpötilaksi. Kastepistelämpötila saadaan selville suoraan

esimerkiksi ”Chilled mirror” -mittarilla. Mittarissa on jonkinlainen metallinen, heijastava pinta, jota jäähdytetään. Kun pinnan lämpötila on kastepisteessä, sille alkaa tiivistyä vettä, jonka jälkeen optinen sensori havaitsee syntyneet vesipisarot esimerkiksi pinnasta heijastetun led-valon avulla.



Kuva 26. Mollier-piirros (Heinonen et al. 2014, 641)

Kuvan 26 Mollier-piirroksessa nähdään ilman kosteuden ja lämpötilan riippuvuus. Jos tiedetään kastepistelämpötila ja ympäristön lämpötila, saadaan piirroksesta selville suhteellinen kosteus. Mitatun kastepistelämpötilan tarkkuus voi olla jopa $\pm 0,1$ °C (Burgass 2021, 2). Mollier-piirroksessa katsottuna $0,1$ °C vaihtelu kastepistelämpötilassa vastaa $0,1$ – $0,4$ % vaihtelua

suhteellisessa kosteudessa normaalissa huoneenlämmössä. Mittareiden tarkkuus on erinomainen, jos lämpötilan mittaamiseen käytetään tarkkaa anturia.

Mittarit, joissa käytetään heijastavia peilejä, voidaan puhdistaa helposti, mikä pidentää mittarin käyttöikää ja niiden tarkkuus pysyy hyvänä. Mittarin hankintakustannukset saattavat olla melko suuret, mutta käytönaikaiset kustannukset ovat yleensä pienet.

4.5 Moottorin nopeus ja teho

Moottorin pyörimisnopeus saadaan magneettisilla antureilla moottorista. Tehon syöttöä mitataan Norma:n vaihtovirtamittarilla ja taajuutta seurataan taajuusmuuttajasta.



Kuva 27. Vanha taajuusmuuttaja.



Kuva 28. Uusi taajuusmuuttaja (ABB 2020, 47)

Uusilla taajuusmuuttajilla saadaan parempi hyötysuhde turvallisemmin ja pienempikokoisilla laitteilla. Uusissa laitteissa saattaa olla myös mallista riippuen käyttöä helpottavia toimintoja, kuten mahdollisuus muuttajan säätöön etänä.

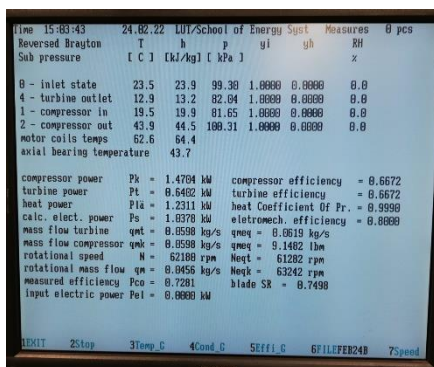
4.6 Poistettu vesi

Poistetun veden massan mittaaminen on tärkeää, jos halutaan käyttää käänteistä Brayton-prosessia ilman kuivattamiseen. Systemistä poistetun veden määrää mitataan Sartoriuksen valmistamalla vaa'alla. Vaaka pystyy valmistajansa mukaan mittaamaan massaa tarkasti alueella 500–5000 grammaa (Sartorius, 2).

5 Tiedonkeruu

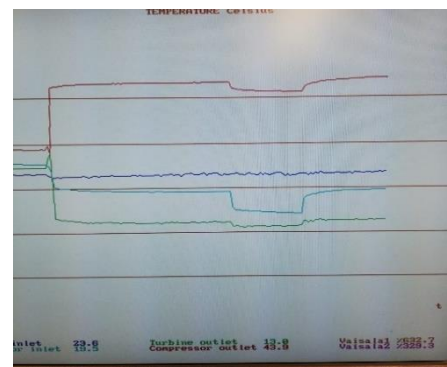
Tiedonkeruun tarkoituksena on muuntaa mittauslaitteilta saatu tieto sähköiseksi signaaliksi sekä käsitellä se muotoon, jota voidaan lukea ja jonka perusteella voidaan seurata prosessin toiminta-arvoja. Triplen tiedonkeruulaitteisto on nykyaikaiseen tekniikkaan verrattuna hidas ja siitä aiheutuu virheitä mittaukseen. Laitteet ovat myös melko isoja ja vievät turhaa tilaa. Tiedonkeruulaitteiston ja -ohjelmiston valmistajaksi valitaan National Instruments, joka tarjoaa erilaisiin mittaukstopauksiin ja -suureisiin sopivia kompakteja moduuleja. Moduulin mallin valitsemiseksi tulee tietää mittalaitteiden määrä ja niiden lähettämän virran suuruus.

Lämpötilan mittaukseen käytetään 16 anturia, eli tarvitaan moduuli, johon kaikki termoelementit saadaan kytkettyä. Termoelementtien lisäksi uudessa mittausjärjestelmässä on 4 paineen mittausta, 2 virtausmittaria, 2 suhteellisen kosteuden mittaria, syötetyn tehon mittaus ja pyörimisnopeuden mittaus, joille kaikille tarvitaan omat kanavat laitteistossa. Yhteensä tarvitaan siis 16 kanavainen termoelementeille tarkoitettu lämpötilamoduuli ja 10 kanavainen virtamoduuli, joka vastaanottaa virtaa alueella 4...20 mA. Alustaksi valitaan NI cDAQ-9174 (National Instruments 2022), johon voidaan yhdistää yhteensä 4 eri moduulia. Alusta voidaan liittää tietokoneeseen USB-kaapelilla. Moduuleiksi valitaan lämpötilan mittaukseen 16 kanavainen NI 9214 ja muille mittareille 16 kanavainen NI 9208 (National Instruments 2022). Triplen ohjelmisto on vanha ja se toimii viiveellä. Nykyaikainen tiedonkeruuhjelmisto mahdollistaa mittauslaitteilta kerätyn tiedon tarkkailun ja havainnollistamisen.



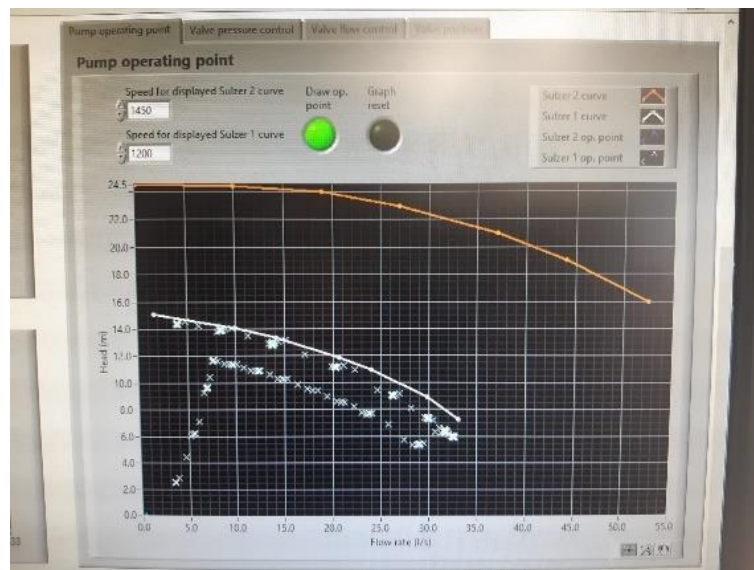
Line	Time	Date	Location	System	Measures	Units
0 - inlet state	23.5	23.9	99.38	1.0000	0.0000	0.0
4 - turbine outlet	12.9	13.2	82.04	1.0000	0.0000	0.0
1 - compressor in	19.5	19.9	81.65	1.0000	0.0000	0.0
2 - compressor out	43.9	44.5	100.31	1.0000	0.0000	0.0
motor coils temp	62.6	64.4				
axial bearing temperature	43.7					
compressor power	Pk	= 1.4704	MW	compressor efficiency	= 0.6672	
turbine power	Pt	= 0.6402	MW	turbine efficiency	= 0.6672	
heat power	Phi	= 1.2311	MW	heat Coefficient of Fr.	= 0.9990	
calc. elect. power	Ps	= 1.0370	MW	electromech. efficiency	= 0.8000	
mass flow turbine	qmt	= 0.0598	kg/s	qmeq	= 0.0619	kg/s
mass flow compressor	qmk	= 0.0598	kg/s	qmeq	= 9.1482	l/min
rotational speed	N	= 62180	rpm	Negt	= 61282	rpm
rotational mass flow	qm	= 0.0456	kg/s	Neg2	= 63242	rpm
measured efficiency	Pco	= 0.7281		blade SR	= 0.7490	
input electric power	Pei	= 0.0000	MW			

Kuva 29. Mittausten seuranta



Kuva 30. Lämpötilat ajan funktiona

Kuvassa 29 on Triplen toiminta-arvojen tarkasteluun tarkoitettu ohjelma ja kuvassa 30 prosessin lämpötilojen kuvaajat ajan funktiona, josta voidaan seurata esimerkiksi stationääritilaa. National Instrumentsin LabVIEW -ohjelmistolla voidaan ohjelmoida halutun mallinen tiedonkeruuohjelma, jonka nopeus ja mahdollisuudet arvojen hyvään havainnollistamiseen ovat nykyistä paremmat. LabVIEWissä käytetään ohjelmointiin graafisia lohkokaavioita, mikä tekee ohjelmoinnista verrattain helppoa.



Kuva 31. LabVIEW -ohjelma

Kuvassa 31 on esimerkki LabVIEW -ohjelmistolla tehdystä keskipakopumpun pumppukäyrän piirtävästä ohjelmasta. Kuvaaja piirtyy pumppua ajettaessa ja samalla tavalla toimivan ohjelman voisi tehdä myös esimerkiksi kompressorin tunnuskentän piirtoon.

6 Uusi mittausjärjestelmä

Käänteisen Brayton-prosessin koelaitteessa Triplessä mitataan seitsemää suuretta: painetta, lämpötilaa, massavirtaa, suhteellista kosteutta, moottorin nopeutta ja tehoa sekä systeemistä poistetun veden massaa. Tässä kappaleessa valitaan parhaiten kuhunkin mittaukseen sopivat laitteet.

Paineen mittaukseen valitaan kohtisuoraan virtausta tehtävät neljä seinämäporausta, jotka on yhdistetty triple-T pietsometrisellä renkaalla Druck -painelähettimeen, jossa käytetään pietsoresistiivistä venymäliuskaa. Osa nykyisistä porauksista ovat 70 asteen kulmassa suuntaan, mistä ei saada yleisesti kovin tarkkoja mittauksia. Porauksia tehdessä tulee olla tarkkana, jotta saadaan oikeanlaiset ja laadukkaat reiät. Pitot-putken, ja virtauksen suunnan kertovan mittarin käyttö ei ole välttämätöntä laitteella tehtävissä mittauksissa, vaan ilman voidaan olettaa virtaavan putken suuntaisesti.

Lämpötilan mittaamiseen valitaan T-tyypin termoelementti. Lämpötilan mittaukseen termoelementit ovat halvan hintansa ja hyvin kalibroituina tarkkuutensa takia yleensä hyvä valinta. Vastuslämpötilamittareiden tarkkuus on termoelementtejä parempi, mutta hyvin kalibroidun T-tyypin termoelementin mittaustarkkuus ei ole niin huono, että olisi kannattavaa maksaa huomattavasti enemmän vastuslämpötilamittareista. Platina on materiaalina hyvin stabiili ja muovattavuuden takia anturit saadaan helposti laitteeseen sopivaksi, mutta lämpötilan mittauksesta tulisi hyvin kallis, kun antureita tarvitaan 16 kappaletta.

Massavirran mittaamiseen valitaan V-cone, jonka kiinnitystavaksi valitaan laippaliitettä helpon irrotuksen mahdollistamiseksi. Virtauskanavaa pidennetään hieman massavirran mittauksen kohdalta, jotta mutkien aiheuttama epävarmuus saadaan lähes mitätöityä. Massavirran mittaamiseen nykyään käytetyn venturiputken mittausvirhe on melko suuri johtuen SFS ISO 5167 -standardin vastaisesta mittausjärjestelystä. Vortex-mittarin kalibroinnin helppouden ja siten tarkkuuden takia, se voisi sopia hyvin kaasun massavirran mittaamiseen.

Koelaitteen pieni koko ja lähellä mittauspisteitä olevat mutkat kuitenkin tekevät vortex-mittarista epävarman. Ultraääni sopisi Triplen mittauksin hyvin putken ulkopuolisen asennuksen takia, mutta useimmat mittarit eivät toimi hyvällä tarkkuudella suurilla virtausnopeuksilla.

Suhteellisen kosteuden mittaamiseen valitaan kastepistelämpömittari. Suhteellisen kosteuden mittaukseen nykyään käytettävän HUMICAP-anturin hyviä puolia ovat kestävyys ja halpa hinta. Kastepistelämpömittarit ovat nykyisen anturin tavoin helppoja huoltaa ja niiden mittausten tarkkuus on erinomainen.

Moottorin taajuuden säätelyyn valitaan uusi korkean hyötysuhteen taajuusmuuntaja. Tehon säätelyyn sekä poistetun veden massan mittaamiseen ei ole tarvetta käyttää uusia mittauslaitteita. Jos laitetta pidettäisiin päällä kauan kosteassa ilmassa, voisi olla hyvä käyttää vaakaa, jossa on hyvä tarkkuus suuremmilla massoilla. Nykyisessä käytössä laitetta ei kuitenkaan yleensä käytetä pitkiä aikoja yhtäjaksoisesti ja laite kerää vettä vain noin litran tunnissa (Backman 1996, 66).

7 Yhteenveto

Tässä kandidaatintyössä suunniteltiin LUT-ilmastointitekniikan laboratorion käänteisen Brayton-prosessin koelaitteelle uusi mittausjärjestelmä. Tavoitteena oli parantaa laitteella nykyisin tehtäviä mittauksia tarkkuuden ja käytännöllisyyden kannalta käyttäen hyväksi uudenlaisia mittauslaitteita ja tiedonkeruulaitteistoa. Tuloksena saatiin mittausjärjestelmä, jonka tulosten kokonaisepävarmuuden tulisi olla huomattavasti pienempi verrattuna vanhoihin mittauksiin.

Mittauslaitteiden virheitä tarkastellessa, nähdään suurimpien virheiden aiheutuvan massavirran ja paineen mittaamisesta. Massavirtaa mitataan venturiputkella, jolle laitteen toiminta-arvot eivät ole sopivat, eikä suoran putken pituus ennen mittaria ole riittävän suuri. Paineen mittaukseen käytettyjä seinämäporauksia ei ole tarpeeksi, eikä niitä olla porattu oikein pienimmän epävarmuuden saamiseksi. Lämpötilan mittauksen epävarmuus voi olla erittäin suuri, jos antureita ei ole kalibroitu oikein ja riittävän usein.

Mittauslaitteiksi valittiin paineelle seinämäporaukset, lämpötilalle T-tyyppin termoelementit massavirralle V-cone virtausmittari, suhteelliselle kosteudelle kastepistelämpötilamittari ja moottorille uusi taajuusmuuntaja. Lisäksi paineen mittaamiseen valittiin uusi painelähetin, joka havaitsee paineen neljästä pietsometrisellä renkaalla yhdistetystä seinämäporauksesta. Moottorin tehon sekä poistetun veden massan mittaamiseen ei valittu uusia mittareita. Trip- len vanha tiedonkeruulaitteisto on hidas, liian suuri ja se lisää mittausepävarmuutta. Tiedonkeruuhjelmistosta puuttuu saatujen mittaustulosten havainnointi ja se toimi viiveellä. Tiedonkeruu uudistettiin valitsemalla uusi modulaarinen laitteisto ja nykyaikainen ohjelmisto.

Lähteet

- Arts, T. et al. 2001. Measurement techniques in fluid dynamics: an introduction. 2. p. Rhode-Saint-Genèse: Von Karman Institute for Fluid Dynamics. 383 s. ISBN: D/2002/0238/474.
- Backman, J. 1996. On the reversed Brayton cycle with high speed machinery. Lappeenranta: Lappeenranta University of Technology. 103 s. ISBN: 951-764-089-7.
- Bell, S. 2001. A Beginner's Guide to Uncertainty of Measurement. Measurement Good Practise Guide. nro 11.
- Burgass R., Chapoy A., V.d.O.C Filho. 2021. Development of a new method for measurement of the water dew/frost point of gas. Fluid Phase Equilibria. Vol 530, nro 112873.
- Çengel Yunus A., Cimbala John M. 2006. Fluid mechanics: fundamentals and applications. 1. p. New York: McGraw-Hill Higher Education. 956 s. ISBN 0-07-247236-7.
- Druck. 2019. UNIK 5000 Pressure Sensing Platform. Luettu 10.4.2022. Saatavissa: <https://classictechnology.ie/wp-content/uploads/2014/09/UNIK-5000-IS2.pdf>
- Fox Robert W., McDonald Alan T. 1992. Introduction to fluid mechanics. 4. p. New York: Wiley & Sons. 829 s. ISBN: 0-471-54852-9.
- Halko, P., Härkönen, S. Lähteenmäki, I., Välimaa, T. 1998. Teollisuuden mittaustekniikka. 7.p. Helsinki: Edita. 143 s. ISBN 951-37-0229-4.
- Hayward, Alan T. J. 1979. Flowmeters: a basic guide and source book for users. Lontoo: Macmillan. 197 s. ISBN 0-333-21920-1.
- Heinonen et al. 2014. Ilmastointitekniikka. Osa 2, Ilmastointilaitoksen mitoitus : opastusta sisäilmaston, ilmastointilaitoksen järjestelmien, tilailmastoinnin, kanavistojen, koneiden sekä jäähdytys- ja rakennusautomaatiojärjestelmien suunnitteluun ja mitoitukseen. Helsinki: Talotekniikka-julkaisut. 647 s. ISBN: 978-952-99770-7-9.
- Hollingshead C. L., Johnson M.C., Barfuss S. L., Spall R. E. 2011. Discharge coefficient performance of Venturi, standard concentric orifice plate, V-cone and wedge flow meters at low Reynolds numbers. Journal of Petroleum Science and Engineering. Vol 78, s. 559-566.

Larjola, J., Arkkio, A., Pyrhönen, J. 2010. Suurnopeustekniikka = High speed technology in Finland. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto, LUT energia. 163 s. ISBN: 978-952-214-949-7.

Lewis C. M., Chambers D. J. 2021. Humidity. Anaesthesia & Intensive Care Medicine. Vol 22, nro 1, s. 54-57.

National Instruments. 2022. NI CompactDAQ Advisor. Luettu 20.4.2022. Saatavissa: <https://ohm.ni.com/advisors/compactdaq/pages/common/intro.xhtml>

Omega engineering. High accuracy pitot-tubes FPT-6000 series. Luettu 4.4.2022. Saatavissa: https://br.omega.com/omegaFiles/green/pdf/FPT6100_6200.pdf

Reader-Harris Michael. 2015. Orifice Plates and Venturi Tubes. Cham: Springer International Publishing. 393 s. ISBN: 9783319168807.

RS components. 2021. Thermocouple Selection Guide. Luettu 15.3.2022. Saatavissa: <https://docs.rs-online.com/96d5/0900766b815e5302.pdf>

Sartorius. Electronic Toploaders Service Instructions. Luettu 28.4.2022. Saatavissa: <https://www.dataweigh.com/media/3522/w-5001-e14008.pdf>

Seppänen O. 1988. Ilmastointitekniikka ja sisäilmasto. Helsinki: LVI-kustannus. 351 s. ISBN: 951-96098-0-6.

SFS. 2003. SFS-EN ISO 5167: Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto.

SFS. 2016. SFS-EN ISO 5167-5: Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full. Part 5. Cone meters. Helsinki: Suomen standardoimisliitto.

Vaisala. 2021. Vaisala HUMICAP® -teknologia. Luettu 5.3.2022. Saatavissa: <https://www.vaisala.com/fi/vaisala-humicap-technology>

Vaisala. 1991. Operating Manual HMP 130Y Series Humidity and Temperature Transmitters.

Vaisala. 2020. Vaisala HUMICAP® -anturi suhteellisen kosteuden mittaamiseen. Luettu 29.2.2022. Saatavissa: <https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/VIM-G-IND-HUMICAP-Technology-description-B210781FI.pdf>

Weckström Thua. 2002. Lämpötilan mittaus. Luettu 10.3.2022. Saatavissa: <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/MIKES/2002-J1.pdf>