

Marjo Kurkinen

VIRTAUSMITTAUKSET
Kaasumaisen virtauksen mittaaminen

Opinnäytetyö
CENTRIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Sähkötekniikan koulutusohjelma
Toukokuu 2017

TIIVISTELMÄ OPINNÄYTETYÖSTÄ

Centria-ammattikorkeakoulu	Aika Toukokuu 2017	Tekijä/tekijät Marjo Kurkinen
Koulutusohjelma Sähkötekniikka		
Työn nimi VIRTAUSMITTAUKSET, Kaasumaisen virtauksen mittaaminen		
Työn ohjaaja Kari Pieniniemi	Sivumäärä 26+1	
Työelämäohjaaja Kari Pieniniemi		
<p>Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli käsitellä teoriassa erilaisia virtausmittareita sekä niiden toimintaperiaatteita. Tämän lisäksi tein virtausmittauksia kahdella eri mittarilla sähköinsinööriopiskelija Jouko Saarivirran rakentamassa päästömittauslaboratoriossa. Laboratoriossa on puhallin, jonka nopeutta voidaan säätää taajuusmuuttajalla.</p> <p>Virtausmittareiden teoriaosuudessa käsitelin seuraavia mittareita: coriolis-mittari, kuumalanka-anemometri, ultraääni-virtausmittarit, vortex-mittari sekä paine-eroon perustuvat virtausmittarit pääpainona pitot-putki. Virtausmittaukset tein AIRFLOW TA410 kuumalanka-anemometrillä sekä Dp-CALC5825-mikromanometriin liitetyllä pitot-putkella.</p> <p>Eri virtausmittareilla saatuja tuloksia oli tarkoitus verrata toisiinsa ja tämän jälkeen säätää puhaltimen vakionopeudet taajuusmuuttajan asetuksista. Mittausten väliset erot olivat kuitenkin sen verran suuret, ettei asetuksia kannattanut lähteä muuttamaan. Laboratorion valmistumisen viivästytyä, mittausten tekeminen jäi sen verran myöhään kevääseen, ettei uusille mittauksille ollut enää aikaa.</p>		

Asiasanat Coriolis, Kuumalanka-anemometri, Pitot-putki, Ultraääni, Virtausmittaus, Vortex

ABSTRACT

Centria University of Applied Sciences	Date May 2017	Author Marjo Kurkinen
Degree programme Electricity technic		
Name of thesis FLOW MEASUREMENT, Measurement of gaseous flow		
Instructor Kari Pieniniemi	Pages 26+1	
Supervisor Kari Pieniniemi		
<p>The aim of this thesis was to review various flow meters in theory and compare their operating principles. In addition, I conducted flow measurements with two different flow meters in an emission measurement laboratory build by electrical engineering student Jouko Saarivirta. For the flow measurements, I used a blower, which can be controlled by the frequency converter.</p> <p>In the theoretical part of the thesis I looked at the coriolis meter, hot-wire anemometer, ultrasonic flowmeters, vortex meter and flowmeters based on pressure-differenced measurement, mainly Pitot tube measurements. Actual flow measurements were made with the AIRFLOW TA410 hot-wire anemometer and the Pitot tube attached to the Dp-CALC5825 micromanometer.</p> <p>The results obtained with the different flow meters were supposed to be compared and then adjust the flow rate accordingly by means of the frequency converter. However, the differences between the measurements were so large that it was not advisable to change the settings of the frequency converter based on these measurements alone. Because of the delays in the construction of the emission measurement laboratory I didn't have time to make further the measurements.</p>		

<p>Key words Coriolis, Flow meters, Hot-wire anemometer, Pitot-tube, Ultrasonic, Vortex</p>
--

KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY

Anemometri	mittalaite, jolla mitataan tuulta tai muuta ilmavirtausta.
Fluidi	väliaineen yleisnimitys. Se on ei-kiinteä aine, joka voi virrata ja muuttaa paineen vaikutuksesta muotoaan. Pääasiassa nesteet, kaasut ja plasmot ovat fluideja.
hPa	ilmanpaineesta käytettävä yksikkö hehtopascal, joka on sama kuin millibaari (mbar)
Hydraulinen halkaisija	Kanavan hydraulinen halkaisija on pyöreän kanavan halkaisija, joka vastaa kitkapainehäviöltään poikkileikkaukseltaan mieltävaltaisen muotoista kanavaa. Sitä tarvitaan soikeiden ja suorakulmaisten kanavien painehäviöiden laskemisessa.
Keskimääräinen virtausnopeus	kaasuvirran keskimääräinen virtausnopeus tietyssä mittaustasossa.
Kosteus	veden ja kuivan kaasun massasuhde.
Mittaustaso	se kanavan poikkileikkauskohta, jossa mittaukset tehdään.
Mittaussyhde	virtauskanavan seinässä oleva läpivienti, jonka kautta voidaan viedä mittalaite eri mittapisteisiin.
Normaalitila	kaasun tila kun $T = 273,15 \text{ K}$ ja $p = 101,325 \text{ kPa}$.
Pitot-putki	laite, jolla mitataan kaasuvirran staattista ja dynaamista painetta.
Staattinen paine	häiriöttömän virtauksen alueella vaikuttava paine.
Suhteellinen kosteus	Prosenttiluku, jolla ilmaistaan, kuinka paljon ilmassa on vesihöyryä siihen nähden, paljonko kyseisessä lämpötilassa vesihöyryä enimmillään voi olla.
Viskositeetti	kertoo aineen sakeudesta/juoksevuudesta. Esimerkiksi vesi on ”laihempaa” ja sillä on pienempi viskositeetti kuin öljyllä, joka on ”paksumpaa” ja jolla on korkeampi viskositeetti.

TIIVISTELMÄ
ABSTRACT
KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY
SISÄLLYS

1 JOHDANTO	1
2 VIRTAUSMITTAUS YLEISESTI	2
2.1 Paine-eroon perustuva virtausmittaus	3
2.1.1 Pitot-putki	5
2.1.2 Mittauspisteen valinta pitot-putkea käytettäessä	10
2.2 Coriolis-virtausmittaus	13
2.3 Ultraäänivirtausmittaus	13
2.4 Vortex-virtausmittaus eli pyörreanamittaus	14
2.5 Kuumalanka-anemometri virtausmittauksissa	15
3 MITTALAITTEET, MITTAUKSET JA TULOKSET	17
3.1 Mittalaitteet	19
3.2 Mittaukset ja tulokset	21
4 POHDINTA	25
LÄHTEET	26
LIITTEET	
KUVIOT	
KUVIO 1. Ilmanpaineen ja kosteuden muutokset mittausten aikana	21
KUVIO 2. Massavirrat eri taajuuksilla	22
KUVIO 3. Massavirtojen keskiarvo taajuuden funktiona.....	23
KUVAT	
KUVA 1. Bernoullin laki	4
KUVA 2. Pitot-putki, L-tyyppi	6
KUVA 3. Virtauksen jakautumien kanavassa.....	7
KUVA 4. Mittaustaso, mittaustasanne ja työskentelyalusta	11
KUVA 5. Mittauspisteiden lukumäärän riippuvuus mittaustason sijainnista ja kanavan koosta	11
KUVA 6. Kolmionmallinen virtauseste. Pyörrevana-anturin rakenne.	14
KUVA 7. Pyörteiden muodostuminen kun virtauseste pyöreä	14
KUVA 8. Kuumalanka-anemometrin tuntoelin.	16
KUVA 9. Konttiin rakennettu laboratorio	17
KUVA 10. Puhallin ja 1,5 kW sähkömoottori	17
KUVA 11. ABB taajuusmuuttaja.....	18
KUVA 12. AIRFLOW TA410.....	19
KUVA 13. Pitot-putki ja Dp-CALC5825	20
TAULUKOT	
TAULUKKO 1. Mittaustulokset	22

1 JOHDANTO

Virtaustekniikkaa on hyödynnetty monilla eri osa-alueilla. Se on oleellinen osa muun muassa kiinteistöjen ilmanvaihdossa ja vesiliitynnässä, teollisuuden eri prosesseissa ja päästöjen mittaamisessa. Virtausmittauksissa mitataan pääsääntöisesti massavirtaa tai tilavuusvirtaa. Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on selvittää millaisia vaihtoehtoisia virtausmittausmenetelmiä on olemassa ja mikä niiden tarkoitus on. Käyn teoreettisesti läpi ainakin paine-eroon perustuvan virtausmittauksen pääpainona pitotputkimittaus, coriolis-mittauksen, vortex-mittauksen, ultraäänimittauksen sekä kuumalanka-anemometrin käytön virtausmittauksissa.

Teoriaosuuden jälkeen mittaan taajuusmuuttajalla säädettävissä olevan puhaltimen virtausta pitotputkella sekä kuumalanka-anemometrillä, jotka sain Centrialta käyttööni. Mittaukset teen insinööriopiskelija Jouko Saarivirran rakentamassa päästömittauslaboratoriossa. Tämän opinnäytetyön tavoitteena on puhaltimen virtaustekninen kalibrointi vertaamalla eri mittausmenetelmin saatuja tuloksia toisiinsa. Vertailu tehdään puhaltimen eri puhallusnopeuksilla ja tämän jälkeen virtausnopeus voidaan säätää suoraan taajuusmuuttajan asetuksien avulla.

Yhtenä lähteenä pitotputkimittauksille käytän standardia SFS 3869, joka on kaasumaisten päästöjen määrittämiseen tehty standardi.

2 VIRTAUSMITTAUS YLEISESTI

Virtausmittauksella tarkoitetaan putken tai avonaisen kanavan tietyn poikkileikkauksen läpi virtaavan tilavuus- tai massavirran määrittämistä. Tilavuusvirtauksessa yksiköinä voidaan käyttää m^3/s , m^3/h tai l/min . Massavirtauksessa yksiköinä käytetään kg/s tai t/h . Kaasuvirtauksen ilmoittaminen tilavuusvirtana on järkevää vain silloin kun tiedetään kaasun paine ja lämpötila. (Pihkala 2004, 59.)

Kun tiedossa on putken tai kanavan poikkipinta-ala, voidaan virtaus laskea aineen virtausnopeuden avulla. Tilavuusvirtaus lasketaan kaavalla 1.

$$\dot{V} = vA \quad (1)$$

jossa \dot{V} = tilavuusvirtaus [m^3/s]
 v = virtausnopeus [m/s]
 A = poikkipinta-ala [m^2]

Massavirta lasketaan kertomalla tilavuusvirta virtaavan aineen tiheydellä

$$\dot{m} = \rho\dot{V} \quad (2)$$

jossa \dot{m} = massavirtaus [kg/s]
 ρ = aineen tiheys [kg/m^3]
 \dot{V} = tilavuusvirtaus [m^3/s]

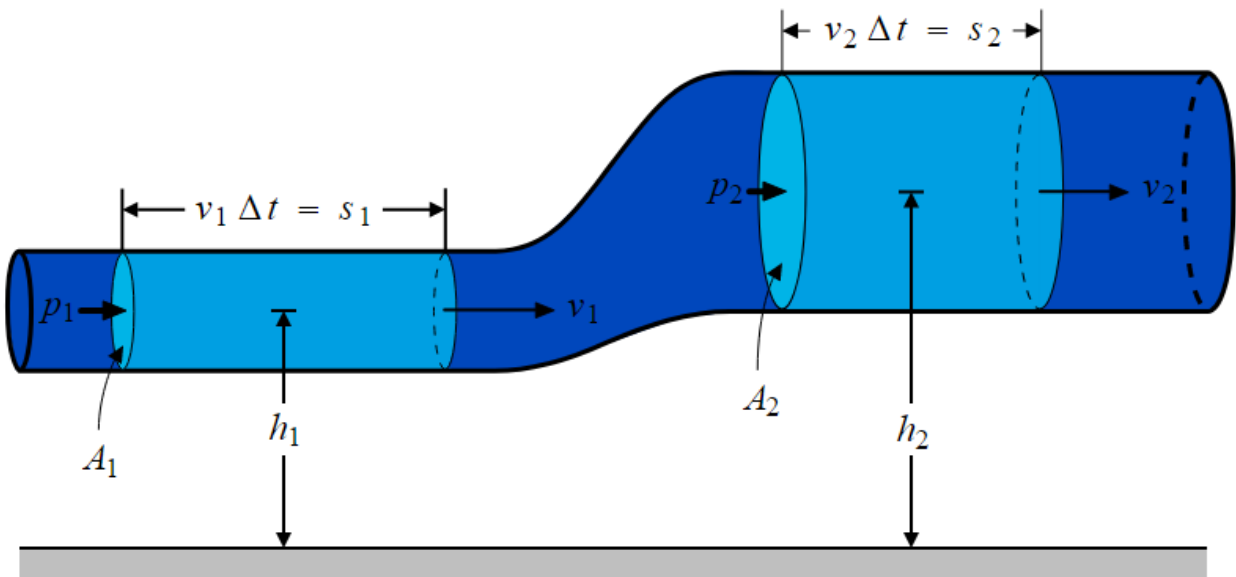
Silloin kun fluidi virtaa kanavassa niin, että virtausnopeus on vakio koko poikkileikkauksessa, on virtaus tulppavirtausta. Käytännössä tällaista tapahtuu hyvin harvoin, sillä normaalisti virtausnopeus on suurempaa kanavan keskellä kuin laidoilla. Laidoilla virtausnopeus pienenee kitkan vaikutuksesta. Virtausnopeusprofiili muuttuu muun muassa aineen viskositeetin ja virtausnopeuden mukaan. Virtausprofiilin muutokset aiheuttavatkin monissa nopeuden mittauksessa perustuvissa antureissa mittausvirheitä. Esimerkiksi putkessa oleva mutka aiheuttaa epäsymmetrisen virtauksen, jolloin nopeimmin liikkuvat hiukkaset ajautuvat keskipakoisvoiman vaikutuksesta ulkokaarteeseen. Myös virtausesteet, kuten venttiilit tai anturit voivat häiritä mittauksia aiheuttamalla virtaukseen pyörteitä. Näiden takia monet anturit edellyttävät riittävän pitkää suoraa osuutta putkessa sekä ennen että jälkeen anturin, jotta virtausprofiili olisi mahdollisimman tasainen. (Pihkala 2004, 60.)

Tilavuusvirtaa seuraamalla voidaan saada selville tietoa kanavan kunnosta, kuten kertyneestä liasta, vuodoista tai muista vioista. Virtausnopeus onkin yksi tärkeimmistä parametreista teollisuuden prosesseissa toimivuuden, turvallisuuden ja stabiiliuden kannalta. Virtausnopeutta voidaan mitata monin eri tavoin ja mittaukset voivat perustua esimerkiksi lämpötilaeroihin, paine-eroon tai fluidin virtauksen aiheuttamaan voimaan. Myös ultraääntä käyttämällä voidaan mitata virtausta. Uusimpia mittaustekniikoita ovat Vortex- ja Coriolis-mittaukset. Vortex-mittarin toiminta perustuu pyörteiden syntymiseen, joita esteet aiheuttavat. Virtausnopeus vaikuttaa pyörteiden syntymistäajuuteen. Coriolis-mittari määrittää massavirran värähtelyn aiheuttaman vaihe-eron avulla. Oikean mittarin valintaan vaikuttavia tekijöitä ovat fluidin olomuoto ja ominaisuudet. Kaikki virtausmittarit eivät sovellu putkistomittauksiin, eikä voida sanoa yhtä ainoaa parasta mittaria, koska kaikissa on omat ominaisuutensa (Korhonen 2016, 7-8.)

2.1 Paine-eroon perustuva virtausmittaus

Silloin kun putkessa on kapeampi kohta, on siinä suurempi virtausnopeus kuin muualla putkessa. Kun nopeutta lisätään, nesteen tai kaasun paine laskee. Virtaavan aineen virtausnopeus siis saadaan kuristuselimen aiheuttaman painehäviön perusteella. Painehäviö on verrannollinen tilavuusvirtaukseen. Ennen kuristinta paine hieman kasvaa, mutta laskee sen jälkeen huomattavasti, jonka jälkeen palautuu lähes normaaliksi. Paineeseen jää kuitenkin pysyvä painehäviö. Virtaus saadaan mittaamalla kuristuselimen aiheuttama painehäviö. Paine-ero riippuu mitattavan aineen ominaisuuksista, mittauskohdasta, kuristuselimen muodosta sekä tietenkin virtauksesta. Paine-ero on mitattava juuri ennen ja jälkeen kuristinta. Siellä missä virtausnopeus on suurin, paine-ero on pienin. (Pihkala 2004, 68.)

Pihkalan kirjassa on kerrottu ainakin seuraavista kuristuselimistä: mittalaippa, suutin, segmenttilaippa ja venturiputki. Kuristuselin liitetään painelähettimeen. Kuristuselinten mitoitus ja rakenteet on määritelty standardeissa ja ne mitoitetaan aina tiettyyn mittaukseen prosessitietojen perusteella. Näihin en tässä opinnäytetyössäni perehdy tämän enempää, vaan keskityn pitot-putken avulla tehtäviin virtausmittauksiin.



KUVA 1. Bernoullin lain mukaisesti putkessa virtaavan nesteen nopeus suurenee ja paine pienenee, kun putki kapenee (Wikipedia)

Bernoullin yhtälöä pidetään virtausopin perusyhtälönä. Kuvassa 1 on esitetty Bernoullin lain periaate. Sen avulla voidaan määrittää putkessa olevan fluidin virtauksen energiamäärä. Yhtälössä 3 on esitetty Bernoullin lauseke yleisessä muodossa. Bernoullin lausekkeesta on useita eri muotoja.

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g z_1 = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g z_2 \quad (3)$$

jossa	p_1	= paine ennen mittaria	[Pa]
	ρ	= virtaavan fluidin tiheys	[kg/m ³]
	v_1	= virtausnopeus ennen mittaria	[m/s]
	g	= vallitseva putouskiihtyvyys	[m/s ²]
	z_1	= korkeusasema ennen mittaria	[m]
	p_2	= paine mittarin jälkeen	[Pa]
	v_2	= virtausnopeus mittarin jälkeen	[m/s]
	z_2	= korkeusasema mittarin jälkeen	[m]

Kun oletetaan korkeudet samaksi, yhtälö saa muodon

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 \quad (4)$$

Kun yhtälö muotoillaan uudelleen, voidaan huomata paine-eron olevan suoraan verrannollinen nopeuden muutoksen neliöön.

$$p_2 - p_1 = \Delta p = \frac{1}{2}\rho(v_2^2 - v_1^2) \quad (5)$$

Pitot-putkelle Bernoullin yhtälö muovaantuu muotoihin 6 ja 7.

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = p_2 \quad (6)$$

Oletetaan, että virtausnopeus $v_2 = 0$, jolloin

$$v_1 = \sqrt{\frac{2(p_2 - p_1)}{\rho}} \quad (7)$$

Jatkuvuusyhtälö (8) silloin, kun fluidi on kokoonpuristuvaa

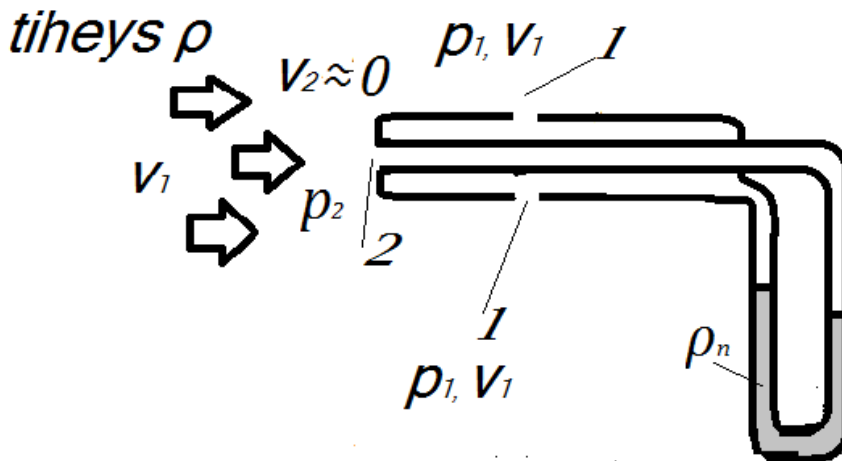
$$\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2 \quad (8)$$

2.1.1 Pitot-putki

Pitot-putken keksi ranskalainen Henri Pitot (1695-1771), joka keksi mitata Seinejoen virtausnopeutta taivutetun lasiputken avulla 1700-luvulla. Pitot-putkella mitataan nesteen tai kaasun paikallista nopeutta virtaussuunnassa putken keskiakselilla. Kulmaan taivutetun pitot-putken pää on puolipallonmuotoinen ja sen päässä on reikä, jossa mitataan virtauksen staattisen ja dynaamisen paineen summa eli kokonaispaine. Virtaussuuntaan kohtisuorissa raoissa mitataan staattinen paine. Jotta virtausnopeus saadaan laskettua, tarvitsee tietää dynaaminen paine. Se saadaan liittämällä mittausaukkoihin kuuluvat yhteet paine-eromittariin. (Pihkala 2004, 73.)

Staattinen paine on järjestelmän ulkoisen ja sisäisen paineen ero, jossa jätetään huomioimatta järjestelmän kaikki liikkeet. Esimerkiksi ilmastointikanavassa staattinen paine on kanavan sisäisen ja ulkoisen paineen ero, ilman, että otettaisiin lukuun kanavassa virtaavasta ilmasta johtuvaa painetta.

Pitot-putkia on kahdenlaisia, S- ja L-tyyppisiä. L-tyypin pitot-putki on tarkoitettu lähinnä suhteellisen kuiviin ja pienten hiukkasmäärien kaasuihin, koska se tukkeutuu helposti. S-tyyppinen putki on parempi vaihtoehto kosteisiin ja runsaasti hiukkasia sisältäviin kaasuihin. Kuvassa 2 on esitetty L-tyyppinen pitot-putki, sekä periaate dynaamisen paineen mittaukselle. (Päästömittausten käsikirja 2015, 13.)



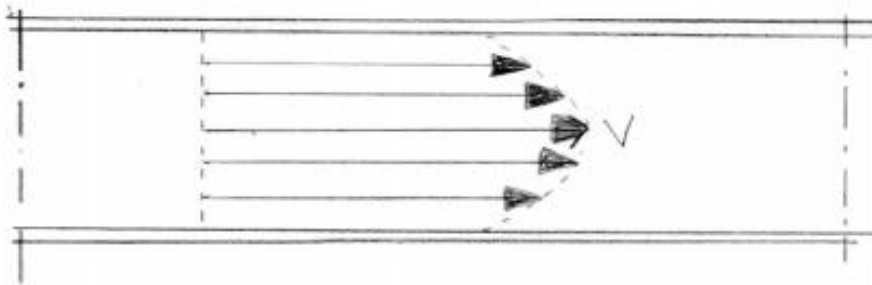
KUVA 2. L-tyyppinen Pitot-putki (mukaillen Valtanen 2010, 223.)

Kuvassa	p_1	= paine kohdassa 1
	v_1	= virtausnopeus kohdassa 1
	p_2	= paine kohdassa 2 = patopaine
	v_2	= virtausnopeus kohdassa 2, käytännössä likimain 0
	ρ_n	= Pitot-putkessa olevan mittaavan nesteen tiheys
	ρ	= virtaavan kaasun tiheys

Pitot-putken ympärillä virtaa kaasu, esimerkiksi ilma. Sen nopeuden ollessa v_1 , virtaus aiheuttaa putken kuoren sisäpuolelle paineen p_1 .

Mittausta tehtäessä pitot-putken suuaukko tulisi suunnata mahdollisimman tarkasti kohtisuoraan virtausta vastaan. Mikäli putkensuu ei ole kohtisuorassa virtaukseen nähden, aiheuttaa se mittaukseen virheitä. Aina kun mahdollista eli kaasun ollessa riittävän kuivaa ja hiukkaspitoisuuden riittävän pieni, olisi parempi käyttää mittaukseen L-tyyppistä pitot-putkea. S-tyypin putkea käytettäessä on otettava huomioon se, että mittaukset tehdään riittävän kaukana kanavan seinämästä, koska seinämä aiheuttaa mittaukseen häiriötä. (Päästömittausten käsikirja 2015, 14.)

Pitot-mittaus antaa virtausnopeuden määrättyssä putken tai virtauskanavan poikkileikkauksessa. Se siis mittaa vain yhtä kohtaa, eikä kerro putkessa tapahtuvaa keskimääräistä virtausnopeutta (kuva 3.) (Räsänen 1994, 77.). Silloin kun pitot-putki on sijoitettuna virtauskanavan keskelle, mittaustuloksena on virtausnopeuden maksimiarvo. Mikäli se on sijoitettavissa virtauskanavan poikkileikkauksen eri kohtiin, voidaan virtauksen nopeusprofiili selvittää. Jotta saavutettaisiin hyvä mittaustarkkuus, edellyttää se suurta huolellisuutta mittausjärjestelyissä. Osasyynä on myös se, että mitattava paine-ero on suhteellisen pieni. (Halko, Härkönen, Lähteenmäki, Välimaa 1990, 104.)



KUVA 3. Virtauksen jakautuminen putkessa (mukaillen Räsänen 1994, 77.)

Kuvasta 3 nähdään, kuinka virtaus on suurinta putken keskilinjassa ja kun lähestytään reunoja, virtausnopeus pienenee. Keskimääräinen virtausnopeus saadaan paikallisten mitattujen nopeuksien aritmeettisena keskiarvona eli

$$v_k = \frac{v_1 + v_2 + \dots + v_n}{n}, \quad (9)$$

jossa n kuvaa mitattujen pisteiden lukumäärää.

Paine-eromittarin lukemat voivat vaihdella suurestikin eri mittauspisteissä. Sen vuoksi yhtä mittauspistettä on mitattava riittävän pitkään keskiarvon ja vaihteluvälin määrittämiseksi. Kun mitattavana aineena on kaasu, on otettava huomioon lämpötilan ja paineen vaikutus mitattavan aineen tiheyteen. Näiden vaikutus voidaan laskea seuraavan yhtälön mukaan

$$\rho_{ws} = \rho_{wn} \times \left(\frac{T_n}{T_s}\right) \times \left(\frac{p_s}{p_n}\right) \quad (10)$$

jossa

$$\frac{p_s}{p_n} = \text{painekorjaus}$$

$$\frac{T_n}{T_s} = \text{lämpötilakorjaus}$$

Normaalitila ($p_n = 1 \text{ atm} = 101,3 \text{ kPa}$ ja $T_n = 273 \text{ K}$)

ρ_{ws} = kostean kaasun tiheys kanavassa [kg/m^3]

ρ_{wn} = kostean kaasun tiheys normaalitilassa [kg/Nm^3] (SFS 3866)

Kostean ilman tiheys voidaan määrittää seuraavasti:

Pitot-putkella mitattu kostean ilman nopeus riippuu kostean ilman tiheydestä ρ_{ws} .

$$v_{ws} = \sqrt{\frac{2P_{dyn}}{\rho_{ws}}} \quad (11)$$

p_{dyn} = dynaaminen paine, Pitot mittaus (Pa)

ρ_{ws} = kostean ilman tiheys kanavassa [kg/m^3]

v_{ws} = kostean ilman nopeus kanavassa [m/s] (SFS 3866)

Ideaalikaasun tilanyhtälön

$$p \cdot V = \left(\frac{m_{air}}{M_{air}}\right) R \cdot T \quad (12)$$

mukaan, voidaan kostean ilman tiheys kirjoittaa seuraavaan muotoon

$$\rho_{ws} = \left(\frac{m_{ws}}{V}\right) = \left(\frac{p \cdot M_{ws}}{R \cdot T}\right) \quad (13)$$

missä

ρ_{ws} = kostean ilman tiheys (kg/m^3)

p = vallitseva ilmanpaine (Pa)

R = yleinen kaasuvakio = $8,314 \text{ J/(K mol)} = 0,0821 \text{ (L atm)/(mol K)}$

M_{ws} = kostean ilman moolimassa (kg/kmol)

m_{ws} = kostean ilman massa

V = tilavuus (m^3)

T = vallitseva lämpötila (K)

Kostean ilman moolimassa (M_{ws}) voidaan lausua kuivan ilman moolimassan (M_{air}) avulla kertomalla se korjauskertoimella C_F .

$$M_{ws} = C_F \cdot M_{air} = M_{air} \cdot r_{air} + M_{H_2O} \cdot r_{H_2O} \quad (14)$$

$$C_F = \frac{M_{air} \cdot r_{air} + M_{H_2O} \cdot r_{H_2O}}{M_{air}} = r_{air} + \frac{M_{H_2O}}{M_{air}} \cdot r_{H_2O} = 1 - \left(1 - \frac{M_{H_2O}}{M_{air}}\right) \cdot r_{H_2O} \quad (15)$$

C_F = moolimassan korjauskerroin

M_{air} = kuivan ilman moolimassa = 28,9775 kg/kmol

M_{H_2O} = veden moolimassa = 18,015324 kg/kmol

r_{air} = kuivan ilman mooliosuus (tilavuusosuus) kosteassa ilmassa

r_{H_2O} = vesihöyryn mooliosuus (tilavuusosuus) kosteassa ilmassa

$$r_{air} + r_{H_2O} = 1$$

$$\frac{M_{H_2O}}{M_{air}} = 0,622$$

Vesihöyryn mooliosuus (tilavuusosuus) ilmassa voidaan määrittää *Raoultin lain* avulla, kun ilman suhteellisen kosteus (RH) ja vallitseva ilmanpaine tunnetaan.

$$r_{H_2O} = \frac{p_{H_2O}}{p} = \frac{RH \cdot p_{sat}}{p} \quad (16)$$

missä

p_{H_2O} = vesihöyryn osapaine ilmassa [Pa]

p = vallitseva ilmanpaine [Pa]

p_{sat} = kylläisen vesihöyryn osapaine ilmassa vallitsevassa lämpötilassa (taulukkoarvo)

RH = ilman suhteellinen kosteus

Kostean ilman moolimassan korjauskerroin voidaan kirjoittaa nyt muotoon

$$C_F = 1 - \left(1 - \frac{M_{H_2O}}{M_{air}}\right) \cdot \frac{RH \cdot p_{sat}}{p} \quad (17)$$

ja kostean ilman tiheydeksi

$$\rho_{ws} = \left(\frac{p \cdot C_F \cdot M_{air}}{R \cdot T} \right) \quad (18)$$

ρ_{ws} = kostean ilman tiheys (kg/m³)

p = vallitseva ilmanpaine (Pa)

R = yleinen kaasuvakio = 8,314 J/(K mol) = 0,0821 (L atm)/(mol K)

M_{air} = kuivan ilman moolimassa = 28,9775 kg/kmol

T = vallitseva lämpötila (K)

RH = ilman suhteellinen kosteus (Päästömittausten käsikirja 2015)

2.1.2 Mittauspisteen valinta pitot-putkea käytettäessä

Päästölaskennan näkökulmasta pitot-mittausta ei voi tehdä mistä vain. Jotta mittaus on mahdollista toistaa myöhemmin ja jotta sitä voi verrata edellisiin mittauksiin tai ylipäätään verrata yhtään mihinkään, mittaukset on tehtävä standardien mukaisesti.

Virtausmittaukseen virheitä aiheuttavia tekijöitä ovat muun muassa liian lähellä mutkaa, kanavakoon muutosta, puhallinta tai muita häiriötekijöitä oleva mittaustaso. Virtauksen olisi tarkoitus olla mahdollisimman häiriötöntä. Häiriötön etäisyys ennen mittatasoa tulee olla vähintään viisi kertaa hydraulinen halkaisija d_h . Etäisyys voi olla tarvittaessa lyhyempikin, mutta silloin mittauspisteiden lukumäärää on lisättävä. Mittaustason tulee olla kohtisuoraan virtausta vastaan. Seuraavalla sivulla kuvassa 3 on esitetty mittausjärjestely kaasumaisten päästöjen määrittämisessä –standardin mukaisesti. (SFS 3869, 9.)

Hydraulinen halkaisija saadaan kaavalla

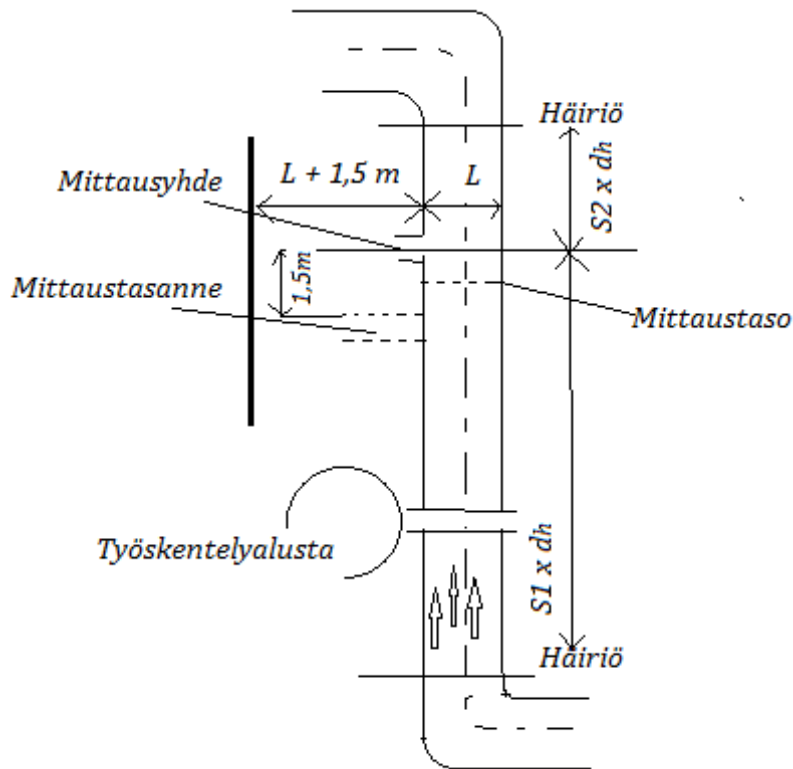
$$d_h = \frac{4A}{U} \quad (19)$$

jossa

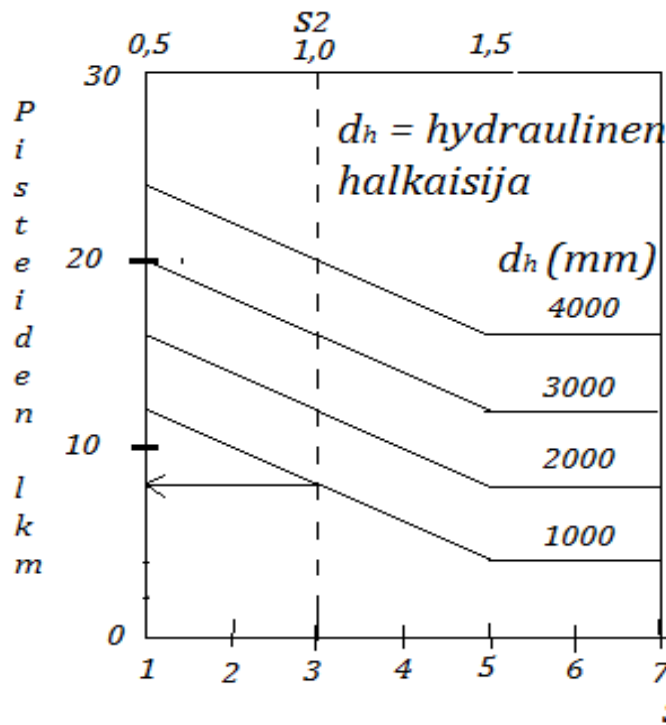
A = pinta-ala [m²]

U = kanavan piiri

Kuvassa 4 esitetään ohjeellinen mittauspisteiden lukumäärän riippuvuus kanavan koosta, häiriölähteistä ja häiriöttömän kanavaosuuden pituudesta mittaustason jälkeen. Kuvan antamista arvoista valitaan suurin mittauspisteiden lukumäärä. Mittaustaso kannattaa sijoittaa niin, että mittauspisteiden lukumäärä jäisi mahdollisimman pieneksi.



KUVA 4. Mittaustaso, mittaustasanne ja työskentelyalusta (mukaillen SFS3869, 9.)



KUVA 5. Mittauspisteiden lukumäärän riippuvuus mittaustason sijainnista ja kanavan koosta (mukaillen SFS3869, 10.)

”Pyöreisiin kanaviin asennetaan normaalisti kaksi yhdettä mittaustasoon 90 asteen kulmaan toisiinsa nähden.

$$S1 = \frac{\text{häiriötön etäisyys ennen mittaustasoa}}{d_h}$$

$$S2 = \frac{\text{häiriötön etäisyys mittaustason jälkeen}}{d_h}$$

Esimerkiksi jos kanavan halkaisija on 1000 mm ja häiriöttömän kanavan osan kokonaispituus on 4000 mm $S1 + S2 = 4$.

Mittaustason paikka valitaan niin, että mittauspisteiden lukumäärä olisi mahdollisimman pieni. Kuvan 5 mukaan valitaan $S1 = 3$ ja $S2 = 1$. Tällöin mittauspisteiden lukumäärä on 8.” (SFS 3869, 11.)

Mikäli kanavan halkaisija on yli 2500 mm, asennetaan neljä yhdettä.

Pyöreissä kanavissa mittauspisteet voivat olla tasavälein ja mittapisteet sijaita kahdella halkaisijalla, jotka ovat kohtisuorassa toisiaan vasten (SFS 3869, 11.).

2.2 Coriolis-virtausmittaus

Coriolis-virtausmittaus perustuu coriolis-voimaan. Se on näennäisvoima, joka johtuu maapallon pyörimisliikkeestä. Tämä voima aiheuttaa sen, että liikkeen suunta kääntyy pohjoisella pallonpuoliskolla oikealle ja eteläisellä pallonpuoliskolla vasemmalle. Coriolis-voiman vaikutuksen voi nähdä tuulien ja merivirtojen suuntautumisena.

Coriolis-virtausmittarilla mitataan massavirtaa. Siinä on yksi tai kaksi virtausputkea, joiden läpi mitattava neste tai kaasu kulkee. Sähköisellä ohjauskäämillä putkiin aiheutetaan voima, joka saa putket värähtelemään omalla resonanssitaajuudella. Kun mitattava aine kulkee putkien läpi, putket taipuvat Coriolis-voiman vaikutuksesta. Putkien taipuminen ja massavirta ovat suoraan verrannollisia ja se voidaan huomata vaihesiirtymänä. Vaihesiirtymästä voidaan laskea massavirta. Coriolis-virtausmittarilla voidaan mitata myös aineen tiheyttä, koska värähtelytaajuus on verrannollinen mitattavan aineen tiheyteen. Tiheys saadaan laskettua mittaamalla värähtelytaajuus. (Emerson 2017)

Coriolis-virtausmittausta kannattaa käyttää silloin, kun halutaan hyvä mittaustarkkuus. Ne ovat helposti asennettavissa, eivätkä ne tarvitse suorita putkiosuuksia tulo- ja lähtöpuolelle. Hyvänä puolena on myös se, että massavirtaan ei vaikuta mitattavan aineen lämpötilan tai paineen muutos, oli kyseessä sitten neste tai kaasu. Ongelmaksi ajan saatossa voi muodostua mittaputkien jäykistymien, mikä johtuu eroosion, korroosion tai pinttymisen aiheuttamasta putken paksuuntumisesta. Kun putkien jäykkyys muuttuu, muuttuvat myös mittarin massavirran ja tiheyden peruskalibrointi. (Emerson 2017)

2.3 Ultraäänivirtausmittaus

Ultraääni on ihmisen kuuloalueen ulkopuolella olevilla taajuuksilla esiintyvää akustista aaltoliikettä. Se etenee kaasussa, nesteessä sekä kiinteässä aineessa. Ääniaaltojen etenemiseen vaikuttaa aineen laatu ja olomuoto. Koska monet asiat, kuten lämpötila ja esimerkiksi veteen liuenneet aineet aiheuttavat ultraäänen etenemisnopeuden muutoksia, se hankaloittaa ultraäänen mittausteknistä soveltamista. (Halko ym. 1990, 109.)

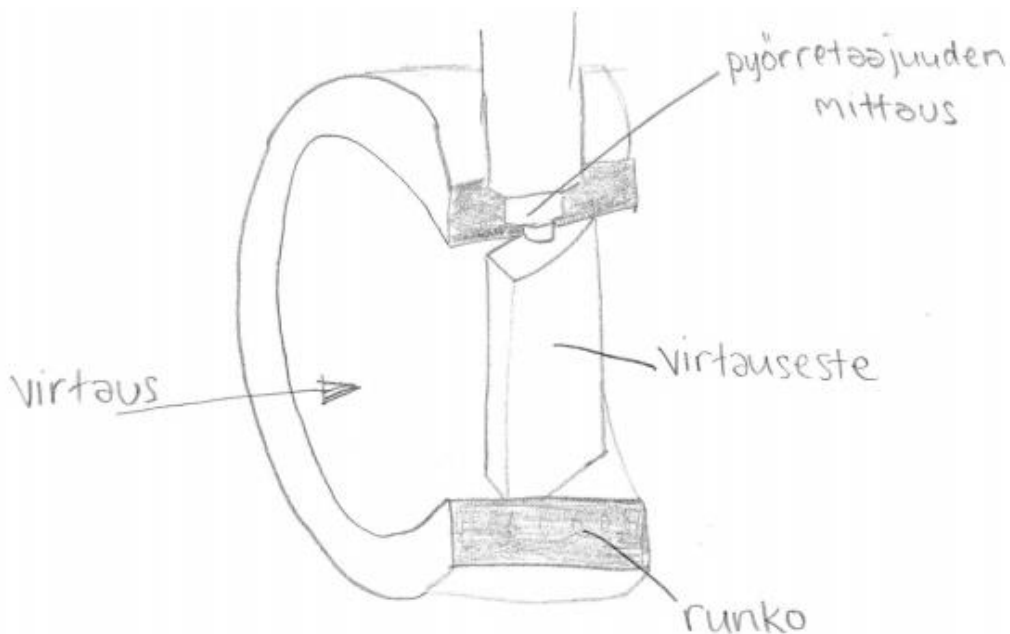
Ultraäänimittarit ovat hinnaltaan edullisia, helposti asennettavissa ja kunnossapidettäviä. Niillä on myös laaja toiminta-alue. Doppler-ilmiöön perustuvaan ultraäänimittariin kuuluu lähetin ja vastaanotin. Lähetin lähettää signaalin kohti mitattavaa fluidia, jonka partikkelit kuten nesteessä olevat kuplat, heijastavat

signaalin vastaanottimeen. Signaalin taajuus muuttuu. Virtaavan aineen virtausnopeus on verrannollinen taajuuden muutokseen. Nämä mittarit soveltuvat parhaiten yksittäisten partikkeleiden mittaukseen eivät niinkään jatkuvan kaasuvirtauksen mittaukseen. Anturin mittaustarkkuus on riippuvaista fluidin konduktiivisuudesta, (Tomukorpi 2011, 30-31.)

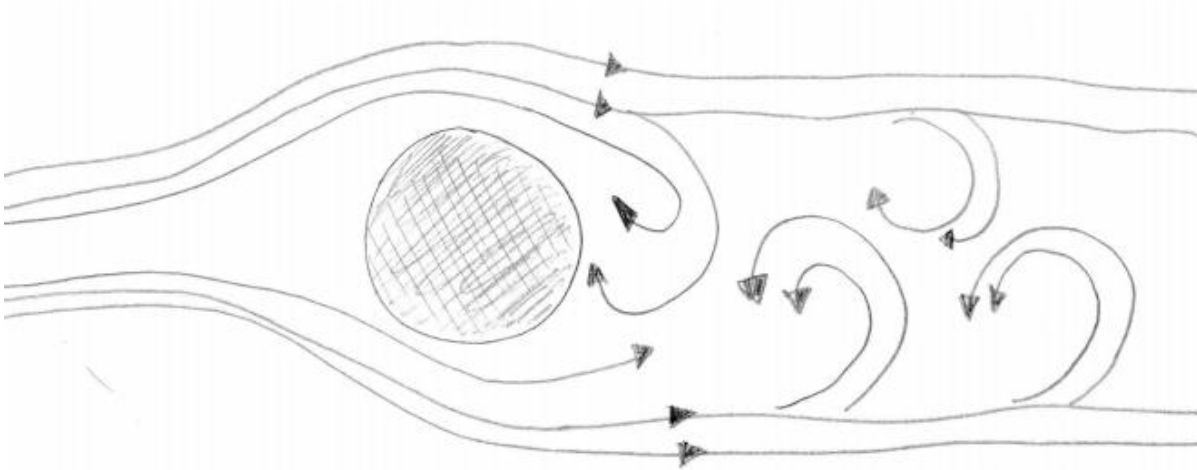
Transit-time-ultraäänimittaus perustuu signaalin kulku-aikaan. Mittarissa on kaksi anturia, joissa molemmissa lähettimet ja vastaanottimet. Anturit voidaan sijoittaa putken päälle. (Tomukorpi 2011, 32). Kun tiedossa on putken koko ja äänennopeus virtaavassa väliaineessa, saadaan signaalin perusteella laskettua väliaineen virtausmäärä. (Konwell 2017)

2.4 Vortex-virtausmittaus eli pyörrevanamittaus

Vortex-virtausmittaus perustuu pyörteiden synnyttämiseen. Mikäli virtauseste on pyöreä poikkileikkaukseltaan, se aiheuttaa pyörteen vuoronperään esteen vastakkaisilta puolilta (KUVA 7). Mitä nopeampaa virtaus on, sitä enemmän pyörteitä syntyy. Virtausnopeus on siis verrannollinen pyörteiden syntymistaajuuteen. Koska pyörteet synnyttävät painevaihteluita, on mahdollista mitata myös paineita kiinnittämällä esimerkiksi esteeseen paineanturi. Virtauseste voi olla myös kolmion muotoinen, kuten kuvassa 6 nähdään. (Frondelius 2005)



KUVA 6. Kolmionmallinen virtauseste; pyörrevana-anturin rakenne (mukaillen Frondelius 2005)

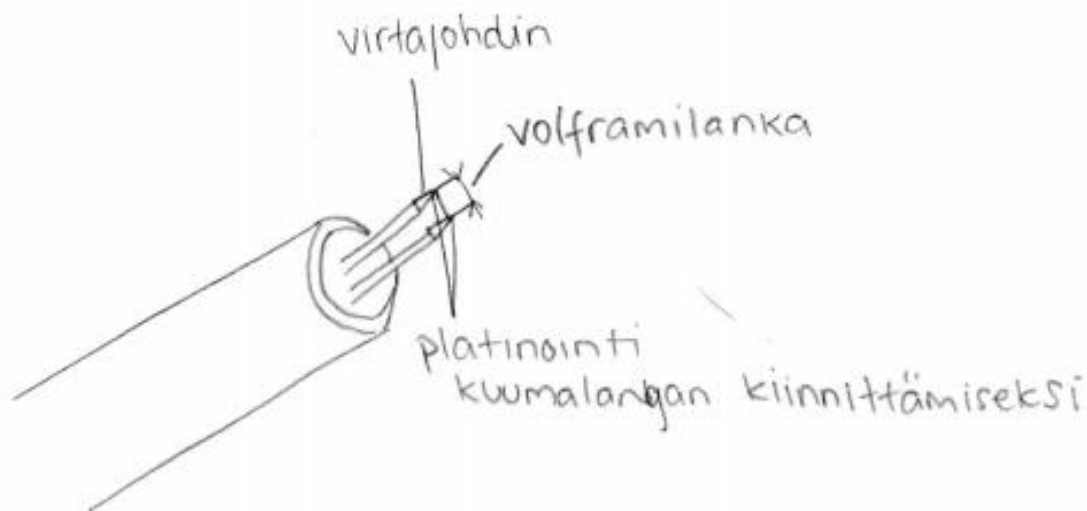


KUVA 7. Pyörteiden muodostuminen, kun virtauseste pyöreä (mukaillen Frondelius 2005)

Pyörteiden syntymiseen vaikuttaa virtausesteen muodon lisäksi niin sanottu kokosuhte eli esteen suhde putken halkaisijaan. Esteen leveydellä on vaikutusta anturissa syntyvään painehäviöön, jonka vuoksi suositeltavaa olisi käyttää mahdollisimman kapeaa virtausestettä. On kuitenkin huomattu pienillä kokosuhteiden arvoilla pyörrevanan olevan epästabiili ja virtaushäiriöille herkkä. Virtauseste tulee sijoittaa symmetrisesti putken keskelle, kohtisuoraan virtausta vastaan ja korkeuden on oltava putken halkaisijan suuruinen. Markkinoilla on poikkileikkaukseltaan useita erilaisia virtausesteitä. (Halko ym. 1990, 114.)

2.5 Kuumalanka-anemometri virtausmittauksissa

Kuumalanka-anemometri on terminen mittari, jonka toiminta perustuu virtauksen jäädyttävään vaikutukseen. Yksi merkittävin käyttökohde on pienillä nopeuksilla tapahtuvien kaasuvirtausten mittaaminen, esimerkiksi ilmastointimittaukset. Anemometrin herkkyys pienenee merkittävästi, kun virtausnopeudet kasvavat. Kuumalanka-anemometrissa on metallilanka, joka kuumennetaan sähköisesti. Se asetetaan siten kaasuvirtaan. Mitä suurempi virtaus on, sitä tehokkaammin se jäädyttää hehkulankaa. Vakiovirtaustyyppisessä kuumalanka-anemometrissa vastuslangassa kulkeva sähkövirta pidetään vakiona. Kun lankaan tuotu sähköinen lämmitysteho on vastaava kuin virtaavaan kaasuun langasta poistuva lämpövirta, lanka saavuttaa termisen tasapainotilan. Mitä voimakkaampi kaasuvirtaus, sitä suurempi on langasta poistuva lämpövirta. Koska langan resistanssi on riippuvainen lämpötilasta, antaa hehkulangan resistanssimittaus tiedon virtausnopeudesta. (Halko ym. 1990, 107.)



KUVA 8. Kuumalanka-anemometrin tuntoelin (mukaillen Halko ym. 1990, 108.)

Vakiojännitetyyppisessä anemometrissa puolestaan pidetään langan jännite vakiona. Lisäksi on olemassa myös vakiolämpötilatyypisiä anemometreja, joissa lämpötila pysyy vakiona langan virtaa säätämällä. Rakenteeltaan kuumalanka-anemometrin tuntoelin on yksinkertainen. Yleensä langan materiaalina käytetään volframia, mutta myös platina ja platina-iridium-seos ovat käytettyjä. Langan halkaisija on vain muutaman mikrometrin ja pituuskin vain 1 millimetrin luokkaa. (Halko ym. 1990, 107.)

Kuumalanka-anemometrin ominaisuuksia ovat muun muassa:

1. Mekaaninen kestävyys ohuella langalla on vähäinen.
2. Kun lankaan kertyy likaa, ominaisuudet muuttuvat.
3. Lanka voi jopa katketa suurten hiukkasten voimasta.
4. Aikavakio on pieni langan pienen massan vuoksi.
5. Lanka tulisi sijoittaa kohtisuoraan virtausta, sillä langan ja virtauksen suunnan välinen kulma vaikuttaa mittaustulokseen. (Halko ym. 1990, 108.)

3 MITTALAITTEET, MITTAUKSET JA TULOKSET

Mittaukset tein insinööriopiskelija Jouko Saarivirran rakentamassa päästölaboratoriossa. Tarvitsin mittauksissani tiedot vallitsevasta ilmanpaineesta, kosteudesta sekä lämpötilasta. Nämä tiedot sain Ilmatieteenlaitoksen internetsivuilta. Virtauskanavan halkaisija tulee myös olla tiedossa. Mittaukset tein kuumalanka-anemometrilla sekä pitot-putkella. Käytössäni oli myös puhallin, jonka nopeutta voidaan säätää taajuusmuuttajalla.



KUVA 9. Konttiin rakennettu laboratorio



KUVA 10. Puhallin ja 1,5 kW sähkömoottori

Kuvassa 9 näkyy osa konttiin rakennettua laboratoriota. Hyvien kuvien ottaminen on hankalaa kontin pitkän muodon vuoksi. Koska rakentaminen päästömittauslaboratorioksi on edelleen kesken, on kuvassa hieman sotkuista. Seinälle on kiinnitetty halkaisijaltaan 168 millimetriä paksu putki. Kuvan oikeassa laidassa olevan mutkan alapuolella on puhallin sekä 1,5 kW kokoinen sähkömoottori (KUVA 10) ja putken yläpuolella oleva valkoinen laatikko on ABB:n valmistama taajuusmuuttaja (KUVA 11). Mittaukset tein kuvassa 9 näkyvän pöydän kohdalla olevasta mittausaukosta. Mittauspisteeltä mutkaan on matkaa noin 2,6 metriä, joka riittää hyvin, ettei mutka aiheuta virtaukseen häiriöitä.



KUVA 11. ABB taajuusmuuttaja

Taajuusmuuttajalla saadaan puhaltimen nopeutta säädettyä. Kuvassa 11 näkyvän taajuusmuuttajan nuolinäppäimistä pääsee taajuutta muuttamaan. Taajuusmuuttajaan voi asettaa 1-7 eri vakionopeutta 0-500 hz välillä.

3.1 Mittalaitteet

Kuumalanka-anemometri AIRFLOW TA410 on ammattikäyttöön tarkoitettu ilmannoepusmittari. Mittari näyttää sekä virtausnopeuden että lämpötilan. Sitä voidaan käyttää 0-20 m/s virtauksilla ja sen tarkkuus on $\pm 5\%$ tai $\pm 0,025$ m/s, riippuen kumpi on suurempi.



KUVA 12. AIRFLOW TA410 –mittari

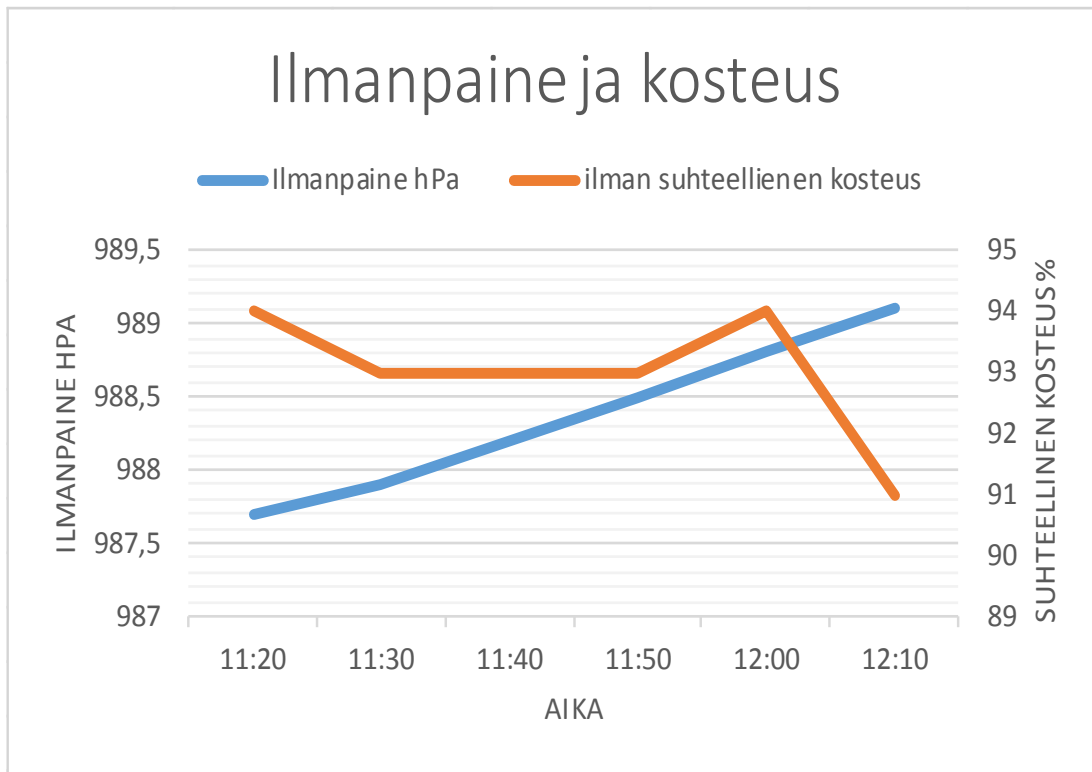
AIRFLOW TA410 –mittarille hyviä käyttökohteita ovat muun muassa ilmastointijärjestelmien mittaukset ja käyttöönotot sekä ilmastointikoneistojen huollot ja tarkastukset. Mittari on helppokäyttöinen ja siinä tulos on hyvin luettavissa näytöltä. Teleskooppivarren ansiosta mittaukset onnistuvat helposti monen kokoisesta kanavasta.



KUVA 13. Pitot-putki ja Dp-CALC5825 -mikromanometri

Kuvassa 13 esiintyvällä Dp-CALC5825 –mittarilla mittasin sekä virtausnopeuden että tilavuusvirran. Sen tarkkuus virtausnopeuden mittauksessa (Pitot) on $\pm 1,5$ prosenttia nopeudella 10,16 m/s. Mittausalue mittarilla on 1,27 - 78,7 m/s.

Vallitsevan ilmanpaineen ja ilmankosteuden tiedot katsoin Ilmatieteenlaitoksen internetsivuilta, koska minulla ei ollut käytettävissä tähän soveltuvaa mittaria. Katson Ilmatieteenlaitoksen antamat tiedot riittäviksi, koska Ylivieskan lentokentällä olevalle sääasemalle on vain 2-3 kilometrin matka mittauspai-
kalta.



KUVIO 1. Ilmanpaineen ja kosteuden muutokset mittausten aikana

Kuviosta 1 voidaan huomata vallitsevan ilmanpaineen ja ilman suhteellisen kosteuden vaihtelevan mittausten aikana. Mittauksissa meni noin puoli tuntia ja tänä aikana ilmanpaine nousi 987,7 hPa:sta 989,1 hPa:iin. Kosteus vaihteli enimmäkseen 93 – 94 prosentin välillä. Lämpötila vaihteli -1 °C molemmin puolin ($-1,1 - (-0,8)\text{ °C}$). Ilman tiheys mittausten aikana oli $1,2617 - 1,2626\text{ kg/m}^3$. Ilman tiheyden laskin Vaisalan kosteuslaskurilla. (LIITE 1)

3.2 Mittaukset ja tulokset

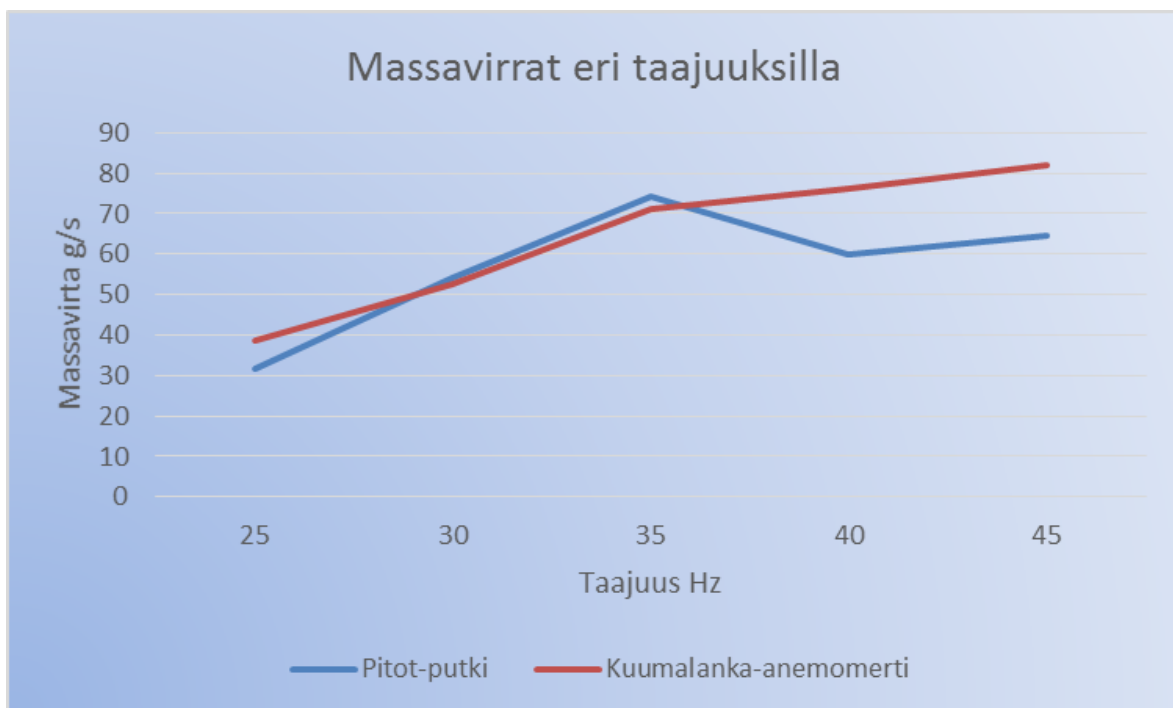
Pitot-mittausta varten tiedossani täytyi olla myös virtauskanavan sisähalkaisija, joka oli 164 millimetriä. Tämä tieto tuli liittää mittariin. Koska kanavan halkaisija olikin noin pieni, ei kappaleessa 2.1.2. esitetty mittauspisteen valinta onnistunutkaan. Tein mittaukset yhdeltä halkaisijalta kolmesta tasavälein olevasta pisteestä, joista keskimäinen kanavan keskellä. Toistin mittaukset viidellä eri taajuudella 25 Hz ja 45 Hz välillä aina viiden hertsin välein. Yhtä mittauspistettä mittasin aina kymmenen sekunnin ajan. Kuumalanka-anemometrilla tein mittaukset samoista pisteistä.

TAULUKKO 1. Mittaustulokset

Taajuus [Hz]	Pitot-nopeus [m/s]	Tilavuusvirta [m ³ /s]	Paine-ero [Pa]	TA410 – nopeus [m/s]
25	1,18	0,02484	0,9	1,45
30	2,0	0,04233	2,6	1,98
35	2,76	0,05833	4,9	2,68
40	2,22	0,04685	3,2	2,86
45	2,39	0,05049	3,7	3,08

Taulukossa 1 on esitetty Pitot-putkella saadut tilavuusvirrat (m³/s), virtausnopeudet (m/s) sekä paine-ero (Pa), sekä virtausnopeuden mittausta AIRFLOW TA410 kuumalanka-anemometrillä.

Kuviossa 2 on esitetty massavirrat eri taajuuksilla. Massavirrat on laskettu tässä opinnäytetyössä esitettyjen kaavojen mukaan. Pitot-putkelle laskin ensin virtausnopeudet pitot-mittauksessa saatujen paineerojen ja Vaisalan kosteuslaskurilla saatujen ilman tiheyksien avulla (KAAVA 11). Tämän jälkeen kaavalla 1 laskin tilavuusvirrat ja kaavalla 2 massavirrat. Kuumalanka-anemometrin antaman virtausnopeuden perusteella laskin tilavuusvirrat ja massavirrat myös kaavoilla 1 ja 2. (LIITE 1)

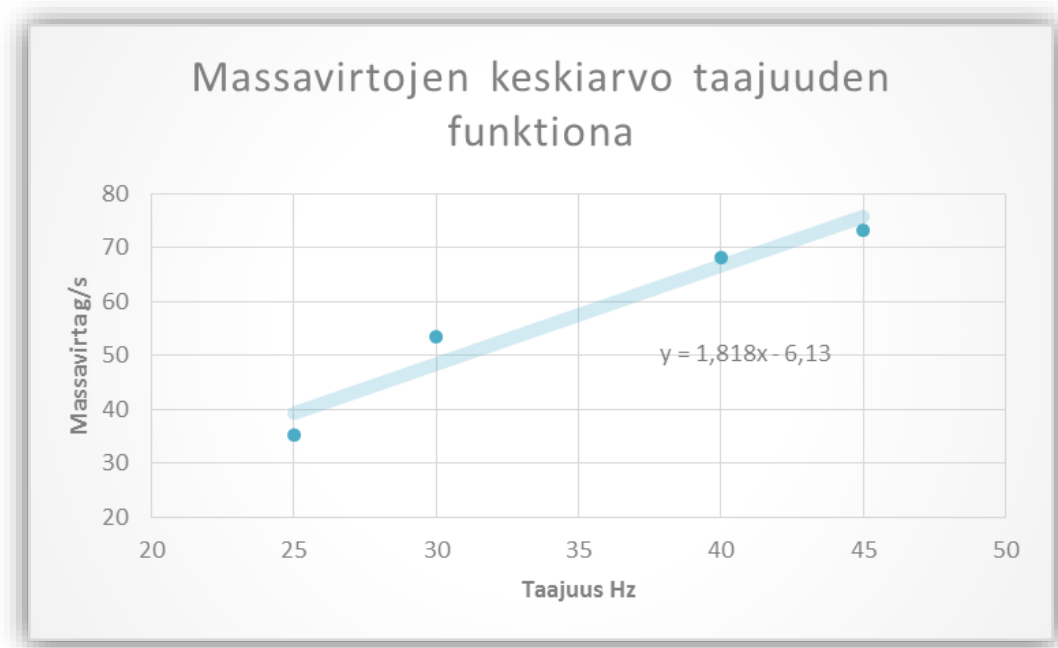


KUVIO 2. Massavirrat eri taajuuksilla

Kuviosta 2 voidaan huomata pitot-putkella tehdyissä mittauksissa, että kolmas mittaus eroaa muista mittauksista, eikä nopeus nousekaan lineaarisesti. Toisaalta se on kuitenkin melko lähellä kuumalanka-

anemometrillä tehtyä mittausta. Kuumalanka-anemometrillä saadut mittaustulokset ovat huomattavasti lineaarisemmat. Tein uusintamittauksen kolmannella nopeudella, saaden samanlaisen tuloksen. Mittaus-tarkkuutta voi heikentää jatkuva ilmanpaineen vaihtelu, koska mittauslaboratorio sijaitsee erittäin tuulisella paikalla ja mittauksia tehdessäni tuulenpuuskat olivat ilmatieteenlaitoksen mukaan 10 - 11 m/s. Virhettä voi aiheuttaa myös se, jos pitot-putken suu ei ole täysin kohtisuorassa virtausta vastaan. Myös kuumalanka-anemometrillä käytössä voi tulla mittausvirheitä, jos se on väärässä asennossa tai mikäli siinä on esimerkiksi likaa.

Laskin massavirtojen keskiarvon jokaisella viidellä taajuudella ja lisäksi kuvaajaan trendiviivan, jätin poikkeavan 35 Hz arvon kuvaajasta pois. Näin puhaltimen massavirta saataisiin suoraan säädettyä taajuusmuuttajasta.



KUVIO 3. Massavirtojen keskiarvo taajuuden funktiona

Tämä kuvaaja 3 ja kuvaajassa esitetty yhtälö ovat kuitenkin vain suuntaa antavia, koska mittaustulokset olivat toisistaan poikkeavat.

Taajuutta ja näin puhaltimen nopeutta olisi voinut nostaa vielä reilustikin, mutta laboratorio on rakennettu konttiin, joka on tuettu ainoastaan laattojen päälle. Tämä epävakaa alusta aiheutti nopeutta lisätessä konttiin tärinää ja huojuntaa, joka puolestaan aiheutti minulle huonon olon ja huimausta. Siitä syystä en lähtenyt nopeutta enää nostamaan. Mittaukset vaativat tarkkuutta ja vievät jonkin verran aikaa, koska yhtä mittauspistettä on mitattava riittävän pitkään tarkemman tuloksen saamiseksi.

Koska mittaukset jäivät näin myöhäiseen kevääseen laboratorion valmistumisen viivästyttäneen ja ajan käydessä vähiin sekä tulosten ollessa näinkin poikkeavat toisistaan en lähde puhaltimen asetuksia säätämään. Mikäli aikaa olisi, tekisin ehdottomasti mittaukset vielä kerran ja mahdollisuuksien mukaan vielä jollain kolmannellakin mittarilla, kuten coriolis-mittarilla, joka on näistä mittareista tarkin, eikä siihen vaikuta ulkopuoliset tekijät kuten ilmanpaine ja lämpötila.

4 POHDINTA

Opinnäytetyön tekeminen oli loppujenlopuksi mielenkiintoinen projekti. Minulla ei ollut virtausmittauksista juurikaan tietoa ennen työn aloittamista. Ainoastaan yksi kurssi, jossa virtaustekniikkaa käsiteltiin jonkin verran. Tämän vuoksi hankaluuksia aiheeseen kiinni pääsemisessä oli runsaasti. Ongelmia oli myös aikataulujen kanssa, koska konttiin rakennettavan laboratorion valmistuminen venyi. Sinne tuli osia useista eri paikoista pikkuhiljaa ja rakentaminen oli suuritöinen. Kiitos ison työn tehneelle Jouko Saarivirrälle!

Alun perin tein mittaukset jo 31.3., jolloin minulla oli käytössäni myös Ylivieskan Centrian puutekniikan laboratorionsa lainaan saatu Vaisalan kosteusmittari. Mittasin Vaisalan mittarilla lämpötilan sekä kosteuden ulkoilmasta ennen virtausmittausten aloittamista ja vertasin Ilmatieteenlaitokselta saataviin tietoihin, jotka olivat täsmälleen samat. Käytin tätä mittaria myös virtausmittausten aikana. Mittasin jokaisella puhaltimen nopeudella virtauskanavassa olevan lämpötilan sekä suhteellisen kosteuden. Koska minulla ei ollut virtausmittauksista aikaisempaa kokemusta, jouduinkin tekemään ne uudelleen eikä minulla ollut näissä lopullisissa mittauksissa sitä enää käytössäni. Olin ensimmäisellä kerralla mitatessani tehnyt mitausten tallennukset väärin. Mittaukset olivat tallentuneet samaksi mittaukseksi, joten viimeiset mittaukset olivat keskiarvoa aivan kaikista eri taajuuksilla mitatuista virtauksista.

En vieläkään ole tyytyväinen saamiini mitaustuloksiin, koska ne poikkesivat toisistaan melko paljon. Olisi ollut parempi, jos mittauksiin olisi päässyt aikaisemmin keväällä ja olisi ollut aikaa tehdä mittauksia esimerkiksi useampana päivänä. Näin mitaustekniikka olisi ollut varmasti parempi ja tuloksetkin varmemmat. Myös esimerkiksi kolmannen mittarin ottaminen mukaan olisi voinut olla hyvä vertailukohta. Varsinkin, jos mittarina olisi ollut vielä coriolis-mittari. Se olisi ollut näistä mittareista kaikista tarkin eikä sen antamiin tuloksiin vaikuta ulkoiset tekijät, kuten ilmanpaine. Mittausten jälkeen luin erästä kandidaatin työtä, jossa oli myös tehty pitot-putkella virtausmittauksia. Siinä oli pahvista leikattu ikään kuin muotti, pinnan normaali, jonka avulla mittaukset taatusti tulevat samalta halkaisijalta, joka taas vaikuttaa positiivisesti mitaustulosten luotettavuuteen.

Vaikka kaikki ei mennyt aivan suunnitelmien mukaan, oli tämä erittäin hyvä oppimiskokemus. Uskon, että mikäli minulla tulevaisuudessa tulee työelämässä tehtäväksi virtausmittauksien tekeminen, selviydyn niistä. Minulle on selvää, mitä asioita mittauksissa pitää ottaa huomioon ja mitkä asiat vaikuttavat mitaustulosten luotettavuuteen.

LÄHTEET

Emerson 2017. Saatavilla: http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Central%20Web%20Documents/VAV_SMV_finnish_lowres.pdf, viitattu 15.3.2017

Frondelius 2005. Saatavilla: <http://moodle.keuda.fi/kansiot/kao-lf/MITTAUS/VORTEX/vortex-mittaus.htm>. Viitattu 15.3.2017

Halko, P., Härkönen, S., Lähteenmäki, I., Välimaa, T. 1990. Teollisuuden mittaustekniikka, perusmittauksia. Helsinki: VAPK-kustannus.

Konwell 2017. Saatavilla: <http://www.konwell.fi/fi/yhteystiedot/114-kenttaelaitteet-ru>. Viitattu 15.3.2017

Korhonen, A. 2016. Paine-eroon perustuvat virtausmittarit. Saatavilla: https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/129844/Kandidaatintyo_Korhonen_Atte.pdf?sequence=2. Viitattu 15.3.2017

Pihkala J, 2004. Prosessisuureiden mittaustekniikka. Toinen painos. Helsinki: Opetushallitus.

Päästömittausten käsikirja osa 1; Päästömittaustekniikan perusteet. Saatavilla: <https://ilmansuojeluyhdistys.files.wordpress.com/2015/05/osa1.pdf> , Viitattu 1.3.2017

Räsänen, J. 1994. Automaatiotekniikan mittauksia. Helsinki: Painatuskeskus Oy.

Tomukorpi, V. 2011. Kaasuvirtauksen eri mittausmenetelmiä. Saatavilla: <https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/38263/Kaasuvir.pdf?sequence=1>, Viitattu 15.3.2017

Torvela, H. 1993. Päästönmittausten perusteet. Painatuskeskus.

Vaisala 2017, Vaisalan kosteuslaskuri Saatavilla: <http://go.vaisala.com/humiditycalculator/5.0/>, viitattu 12.4.2017

Valtanen, E.2010. Tekniikan taulukkokirja, 18. painos. Genesis-kirjat Oy.

SFS 3869, Kaasumaisten päästöjen määrittäminen. Suomen standardoimisliitto. SFS-Online. Viitattu 15.3.2017

SFS 3866. Kiintoaineen määrittäminen manuaalisella menetelmällä. Suomen standardoimisliitto. SFS-Online. Viitattu 15.4.2017

TAULUKKO 1. Mittaustulokset

Taajuus	Kuumalanka-anemometri m/s	Pitot-nopeus m/s	Pitot-tilavuusvirta m ³ /s	Paine-ero
25 Hz	1,45	1,18	0,02484	0,9
30 Hz	1,98	2	0,04233	2,6
35 Hz	2,68	2,76	0,05833	4,9
40 Hz	2,86	2,22	0,05685	3,2
45 Hz	3,08	2,39	0,05049	3,7

TAULUKKO 2. Olosuhdetiedot

Aika	Ilmanpaine hPa	Suhteellinen kosteus %	Lämpötila °C	Ilman tiheys kg/m ³
11:20	987,7	94	-1,1	1,2622
11:30	987,9	93	-1	1,262
11:40	988,2	93	-0,9	1,2619
11:50	988,5	93	-0,9	1,2623
12:00	988,8	94	-0,7	1,2617
12:10	989,1	91	-0,8	1,2626

TAULUKKO 3. Lasketut tilavuus- ja massavirrat

Taajuus	Pitot tilavuusvirta m ³ /s	Massavirta kg/s	Kuumalanka tilavuusvirta m ³ /s	Massavirta kg/s
25 Hz	0,0252	0,0318	0,0306	0,0386
30 Hz	0,0428	0,0541	0,0418	0,0527
35 Hz	0,0589	0,0743	0,0565	0,0713
40 Hz	0,0475	0,0599	0,0603	0,0762
45 Hz	0,0511	0,0645	0,065	0,082