

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

Teknillinen tiedekunta

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0200 Energiatekniikan kandidaatintyö ja seminaari

Aksiaalipuhaltimen tunnuskentän mittaus

The measurement of fan characteristics for axial fan

Työn tarkastaja: Tutkijaopettaja Teemu Turunen-Saaresti

Työn ohjaaja: Tutkija Petri Sallinen

Lappeenranta 20.10.2011

Jonna Tiainen

TIIVISTELMÄ

Jonna Tiainen

Aksiaalipuhaltimen tunnuskentän mittaus

Teknillinen tiedekunta

Energiatekniikan koulutusohjelma

Kandidaatintyö 2011

47 sivua, 30 kuvaa, 5 taulukkoa ja 7 liitettä

Hakusanat: aksiaalipuhallin, tunnuskenttä

Puhaltimen tunnuskenttä koostuu puhallinkäyristä, jotka esittävät puhaltimen toimintaa tietyllä pyörimisnopeudella ja siipikulmalla. Puhallinkäyrä on graafinen esitys, jossa yleensä käytetään x-akselilla tilavuusvirtaa ja y-akselilla puhaltimen kokonais- tai staattista painetta. Tässä kandidaatintyössä on tavoitteena todeta puhaltimen valmistajan ilmoittaman tunnuskentän paikkansapitävyys.

Aksiaalipuhaltimen suoritusarvojen mittaus toteutetaan tässä kandidaatintyössä yhdellä pyörimisnopeudella ja siipikulmalla. Työssä esitetään mittausjärjestelyt, tarvittavat mittalaitteet sekä tunnuskentän laskentaan käytettävät yhtälöt. Saaduista mittaustuloksista tuotetaan puhaltimen tunnuskenttä.

Mittausepävarmuusrajoissa mittaustulokset eivät vastaa valmistajan ilmoittamaa tunnuskenttää. Tämä saattaa johtua turbulenttisesta virtauksesta puhaltimen imuaukolla. Virtauksen muuttaminen aksiaaliseksi on mahdollista virtauksen oikaisijalla tai liittämällä kaksi eri suuntiin pyörivää puhallinta sarjaan. Sarjassa toimivat puhaltimet kasvattavat kokonaispainetta. Tilavuusvirran kasvattamiseksi voidaan joko liittää kaksi puhallinta rinnan tai nostaa puhaltimen pyörimisnopeutta.

SISÄLLYSLUETTELO

Symboli- ja lyhenneluettelo	4
1 Johdanto	6
2 Mittausjärjestely	7
2.1 Liitäntätapa kanavistoon.....	9
2.2 Ilman kosteuden mittaus.....	10
2.3 Ilman tiheys.....	10
2.4 Tilavuusvirran mittaus.....	11
2.5 Paineen mittaus	11
3 Mittalaitteet	13
3.1 Ilman kosteuden mittaus kapasitiivisella anturilla	13
3.2 Dynaamisen paineen mittaus pitot-putkella.....	14
3.3 Virtausnopeuden mittaus termooanemometrilla	19
3.4 Paine-eron mittaus ilmavirran mittauslaitteella	20
3.5 Staattisen paineen mittaus barometrilla ja painemittarilla.....	21
3.6 Lämpötilan mittaus termoelementillä tai vastusanturilla	23
4 Mittalaitteiden kalibrointi	25
4.1 Kapasitiivisen anturin kalibrointi.....	25
4.2 Painemittarin kalibrointi.....	26
4.3 Termoelementin kalibrointi	28
5 Suoritusarvojen laskenta	29
5.1 Ilman tiheyden laskenta	29
5.2 Tilavuusvirran laskenta	29
5.3 Puhaltimen kokonaispaineen laskenta.....	30
5.4 Kokoonpuristuminen	32
5.5 Suoritusarvojen muuntaminen	33
5.6 Mittausepävarmuuslaskenta.....	34
5.6.1 Pitot-putki	36
5.6.2 Termooanometri	38
5.6.3 Ilmavirran mittauslaite.....	39
5.6.4 Kokonaispaine.....	40
5.7 Puhaltimen tunnuskenttä.....	40
6 Johtopäätökset	44
7 Yhteenveto	47
Lähdeluettelo	48
Liite 1. Puhaltimen valmistajan ilmoittama tunnuskenttä	50

Liite 2. Painemittarin kalibrointipöytäkirja	51
Liite 3. Termoelementin kalibrointipöytäkirja	52
Liite 4. Puhaltimen mittauspöytäkirja	53
Liite 5. Tilavuusvirran laskentatulokset	56
Liite 6. Kokonaispaineen laskentatulokset	58
Liite 7. Mittaustulokset valmistajan ilmoittamassa tunnuskentässä	59

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset aakkoset

A	pinta-ala	m^2
D	mittauskanavan halkaisija	m
l	kanavan pituus	m
n	pyörimisnopeus	rpm
p	paine	Pa
p_a	ilmakehän paine	mmHg, Pa
p_d	dynaaminen paine	Pa
p_h	vesihöyryn osapaine	Pa
p'_h	vesihöyryn osapaine kyllästystilassa	Pa
p_s	staattinen paine	Pa
p_{sa}	absoluuttinen staattinen paine	Pa
p_t	kokonaispaine	Pa
p_{ta}	absoluuttinen kokonaispaine	Pa
q_m	massavirta	kg/s
q_v	tilavuusvirta	m^3/s
t	lämpötila	$^{\circ}C$
T	lämpötila	K
w	virtausnopeus	m/s
x	mittauspisteen etäisyys kanavan seinästä	m

Kreikkalaiset aakkoset

α	siipikulma	$^{\circ}$
Δp	paine-ero, painehäviö	Pa
μ	dynaaminen viskositeetti	kg/ms
ν	kinemaattinen viskositeetti	m^2/s
ρ	tiheys	kg/m^3
φ	suhteellinen kosteus	%

Dimensiottomat luvut

k_p	kokoonpuristuvuuskerroin
n	mittauspisteiden lukumäärä
Re	Reynoldsin luku
s	otoskeskihajonta
\bar{x}	otoskeskiarvo
λ	kitkavastuskerroin
π	painesuhde

Alaindeksit

0	kanaviston imuaukko
1	puhaltimen imuaukko
2	puhaltimen paineaukko
3	mittausleikkaus puhaltimen imupuolella
4	mittausleikkaus puhaltimen painepuolella
a	absoluuttinen, ilmakehä
d	dynaaminen
h	vesihöyry
m	keskimääräinen, massa-
s	kyllästystila, staattinen
t	kokonais-
v	tilavuus-
x	mielivaltainen mittausleikkaus

Lyhenteet

MgCl ₂	magnesiumkloridi
NaCl	natriumkloridi

1 JOHDANTO

Puhallin on keskeinen ilmastointitekniikan kone, joka eroaa kompressorista pienemmällä painesuhteellaan. Puhaltimia käytetään ilmastoinnissa ilman siirtämiseen kanavistos- ja huoneessa. Ilman liike saadaan aikaan pyörivän siipipyörän avulla. Tärkeimmät puhaltimen valintaan vaikuttavat tekijät ovat ilmavirta sekä puhaltimen synnyttämä paine-ero. (Seppänen 1988, 121)

Pääsääntöisesti puhaltimet jaetaan keskipakois- ja aksiaalipuhaltimiin. Keskipakoispuhaltimessa ilma muuttaa suuntaansa kahdesti, kun taas aksiaalipuhaltimessa ilma tulee ja lähtee puhaltimesta suuntaansa muuttamatta (Energy Efficiency Guide Book, 93). Puhaltimet voidaan jakaa myös pien-, keski- ja suurpainepuhaltimiin. Pienpainepuhaltimilla paine-ero on alle 720 Pa, keskipainepuhaltimilla välillä 720 ja 3600 Pa ja suurpainepuhaltimilla yli 3600 Pa. (Seppänen 1988, 121)

Puhaltimien suoritusarvoista voidaan tuottaa tunnuskenttä, joka koostuu puhallinkäyristä. Käyrät esittävät puhaltimen toimintaa tietyllä pyörimisnopeudella ja siipikulmalla. Puhallinkäyrä on graafinen esitys, jossa yleensä käytetään x-akselilla tilavuusvirtaa ja y-akselilla puhaltimen kokonais- tai staattista painetta. (Energy Efficiency Guide Book, 97)

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on tuottaa aksiaalipuhaltimen tunnuskenttä ja selvittää, vastaako se valmistajan ilmoittamaa tunnuskenttää. Työssä käydään aluksi läpi mittausjärjestelyt, esitellään tarvittavat mittalaitteet sekä tunnuskentän laskentaan käytettävät yhtälöt. Lopuksi esitellään mittaustulokset ja niiden avulla tuotettu puhaltimen tunnuskenttä sekä verrataan saatua ja valmistajan ilmoittamaa tunnuskenttää toisiinsa.

2 MITTAUSJÄRJESTELY

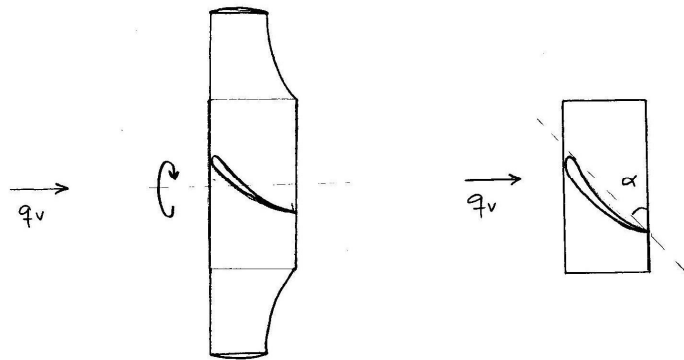
Tässä työssä mitataan Miracon Miravent -aksaalipuhallinta MV 31 - 135/8 (kuvat 2.1 ja 2.2). Liitteessä 1 esitetään osa puhaltimen valmistajan ilmoittamasta tunnuskentästä, johon on hahmoteltu katkoviivalla likimääräinen suoritusarvokäyrä, jonka arvoihin puhaltimen pitäisi päästä siipikulmalla $\alpha = 29^\circ$. Sen mukaan pyörimisnopeudella $n = 2880$ rpm ja siipikulmalla $\alpha = 29^\circ$ puhaltimen tuottama kokonaispaine olisi $p_t = 350$ Pa ja tilavuusvirta $q_v = 1,0$ m³/s. Kuva 2.3 havainnollistaa puhaltimen siipikulman määrittelyä. Siipikulmaa säätämällä voidaan muuttaa puhaltimen tuottaman ilman tilavuusvirran suuruutta. Puhaltimen mittaamisella todetaan valmistajan ilmoittaman tunnuskentän paikkansapitävyys.



Kuva 2.1: Miravent -aksaalipuhallin MV 31 - 135/8.



Kuva 2.2: Miravent -aksaalipuhallin edestä.



Kuva 2.3: Puhaltimen siipikulma α .

Puhaltimen tunnuskentän määrittämiseksi on tunnettava puhaltimen läpi virtaavan ilman tilavuusvirta q_v sekä puhaltimen tuottama kokonaispaine p_t . Puhaltimen suoritusarvoja mitataan pyörimisnopeudella $n = 2880$ rpm ja siipikulmalla $\alpha = 29^\circ$. Tilavuusvirtaa säädetään kuvan 2.4 mukaisella säätöpellillä. Mittaus toteutetaan kymmenellä eri säätöpellin asennolla niin, että ensin säätöpelti on täysin auki ja sitten sitä suljetaan kymmenen asteen (10°) välein. Viimeinen mittaus toteutetaan säätöpellin ollessa täysin kiinni eli 90 asteen kulmassa. Käytännössä säätöpelti kuitenkin aiheuttaa vuodon ollessaan täysin kiinni.

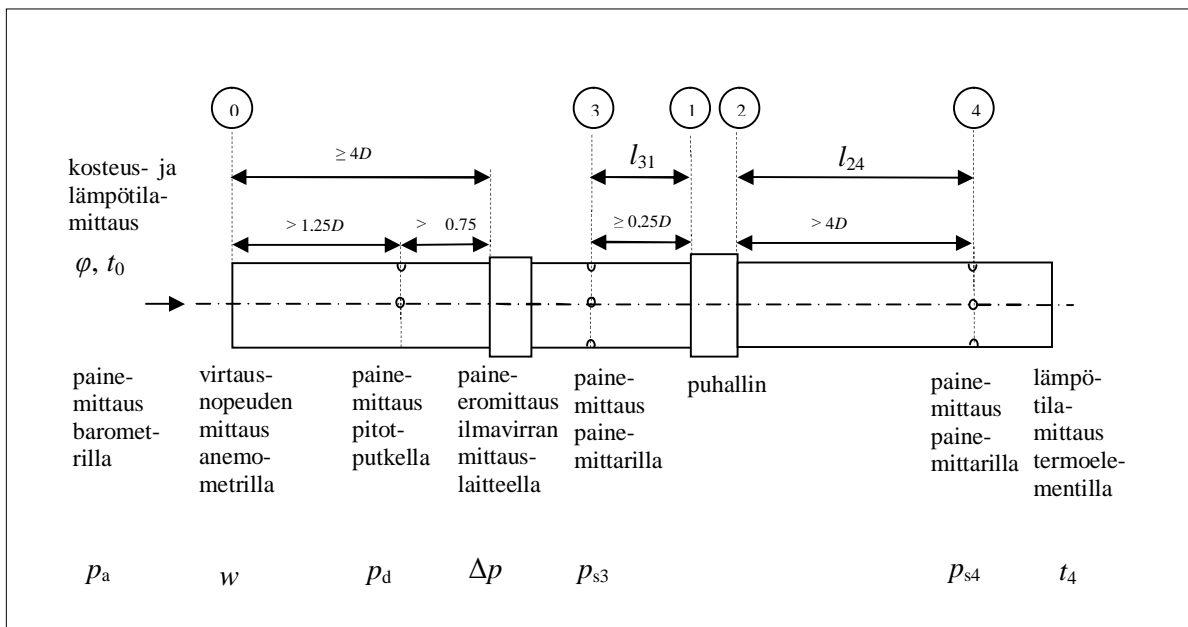


Kuva 2.4: Säätöpelti tilavuusvirran kuristamiseen.

Tilavuusvirran määrittämiseen käytetään kolmea vaihtoehtoista tapaa, joilla saatuja tuloksia verrataan toisiinsa. Tilavuusvirran laskentaa varten mitataan kanavassa ilmavirtauksen aiheuttama dynaaminen paine p_d pitot-putkella, virtausnopeus w termoanemometrillä sekä paine-ero Δp erityisellä paine-eroon perustuvalla ilmavirran mittausseläitteellä. Kokonaispaineen laskemiseksi mitataan virtauksen staattinen paine p_s sekä puhaltimen imu- että painepuolella.

2.1 Liitöntäpaa kanavistoon

Puhaltimet voidaan jakaa ryhmiin sen mukaan onko puhaltimen imu- ja/tai painepuoli liitetty kanavaan. Tässä työssä sekä puhaltimen imu- että painepuoli ovat liitetty kanavaan, jonka halkaisija $D = 315$ mm. Kuvassa 2.5 esitetään puhaltimen liitöntäpaa kanavistoon, minimietäisyydet mittausseläikkauksien sijainneille, tarvittavat mittalaitteet sekä mitattavat suuret. Puhaltimen imuaukko sijaitsee pisteessä 1, paineaukko pisteessä 2 sekä paineenmittausleikkaukset pisteissä 3 ja 4. Kanaviston imuaukkoa kuvataan pisteellä 0.



Kuva 2.5: Mittausjärjestelyt minimietäisyyksineen, tarvittavat mittalaitteet sekä mitattavat suuret.

Suomen standardisoimisliiton julkaiseman SFS-käsikirjan (Ilmastointiteknikka osa 1, 118) mukaan mittasuhteiltaan ja rakenteeltaan tarkimmin standardeissa määriteltyjä mittauskanavan osia ovat paineenmittausleikkausten ja puhaltimen väliset osat, joista mittauksen tarkkuus riippuu oleellisesti. Kutakin liitântätapaa varten on valittavissa erilaisia standardinmukaisia mittauskanavasovituksia, jotka poikkeavat toisistaan varsinkin tilavuusvirran mittaukseen käytetyn mittauselimen osalta. Puhaltimia vertailtaessa tulee huomioida, että eri mittauskanavilla saadut tulokset ovat suoraan vertailukelpoisia vain, jos puhaltimen kanavistoon liittämiseen on käytetty samaa liitântätapaa.

2.2 Ilman kosteuden mittaus

Puhaltimen mittaustilan kosteus vaikuttaa ilmastointikanavassa virtaavan ilman tiheyteen ρ . Ilman kosteuden mittaus toteutetaan digitaalisella kosteus- ja lämpömittarilla imuaukon läheisyydessä. Kun mitataan ilman suhteellinen kosteus φ ja ilman lämpötila t_0 imuaukon läheisyydessä, saadaan vesihöyryn osapaine kyllästystilassa p'_h luettua esimerkiksi vesihöyryn h,s -piirrokselta. Vesihöyryn osapaine p_h saadaan suhteellisen kosteuden ja vesihöyryn kyllästystilan osapaineen avulla yhtälöstä (Seppänen 1988, 188)

$$\varphi = \frac{p_h}{p'_h} \quad (1)$$

$$p_h = \varphi p'_h.$$

2.3 Ilman tiheys

Kun tunnetaan vesihöyryn osapaine ja barometrillä mitattava mittaustilan staattinen paine p_a , lasketaan ilman tiheys imuaukon läheisyydessä ISO 5801 -standardin (2007, 27) yhtälöstä

$$\rho_0 = \frac{p_a - 0,378p_h}{287(273 + t_0)}. \quad (2)$$

Mittaustilan ilman tiheyden avulla voidaan laskea ilman tiheys missä tahansa kanavan mielivaltaisesti valitussa pisteessä yhtälöllä

$$\rho_x = \rho_0 \frac{p_a + p_{sx}}{p_a} \frac{273 + t_0}{273 + t_x}, \quad (3)$$

jossa p_{sx} on staattinen paine ja t_x lämpötila kyseessä olevassa pisteessä. (Ilmastointiteknikka osa 1, 127)

2.4 Tilavuusvirran mittaus

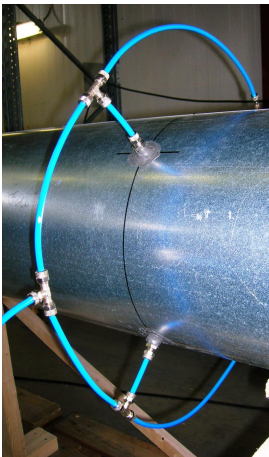
Tilavuusvirta kanavistossa määritetään kolmella vaihtoehdoisella tavalla ja saatuja tuloksia verrataan toisiinsa virhearvion parantamiseksi. Tilavuusvirran mittaukseen käytetään pitot-putkea, termoanemometriä sekä erityistä paine-eroon perustuvaa ilmavirran mittauslaitetta. Ilmavirran mittauslaite sijoitetaan kuvan 2.5 mukaisin minimietäisyyksin kanavistoon. Mittaus termoanemometrillä suoritetaan kanavan imuaukolla niin, että sensori on kanavan halkaisijan keskipisteessä.

2.5 Paineen mittaus

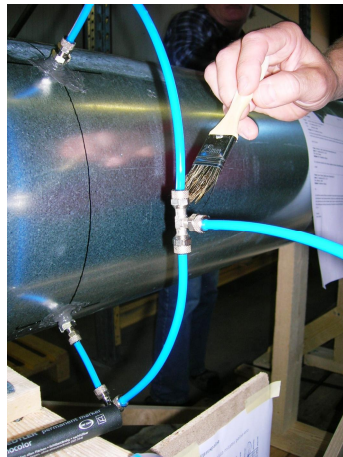
Puhaltimen kokonaispaineen laskentaa varten mitataan virtauksen staattinen paine p_s molemmiin puolin puhallinta. Sekä puhaltimen imu- että painepuolella staattisen paineen mittaus toteutetaan paineenmittausyhteiden avulla. Staattinen paine johdetaan painemittariin neljän tasavälein kanavan kehälle sijoitetun seinäyhteen kautta, jotka yhdistetään toisiinsa rengasputken avulla kuvan 2.5 mukaisesti. Paineenmittausyhteen reiän suun on oltava teräväreunainen, jäysteetön ja tasassa kanavan sisäpinnan kanssa (Ilmastointiteknikka osa 1, 123). ISO 5801 -standardi (2007, 23) määrittelee, että yhteen halkaisijan tulee olla suurempi kuin 1,5 mm ja pienempi kuin 5 mm tai $0,1D$ sekä yhteen pituuden vähintään kaksi kertaa yhteen halkaisija.

Mitattaessa staattista painetta seinäyhteillä, voi putkiliitosten vuoto aiheuttaa suuren virheen mittaustuloksiin. Virhelähteiden minimoimiseksi mahdollisten vuotojen tarkistukseen käytetään tässä työssä silmämääräistä havainnointia ja saippuavesiliuosta. Liu-

osta laitetaan kaikkiin mahdollisiin vuotokohtiin kuvan 2.6 mukaisesti ja vuoto havaitaan saippuan kuplimisena vuotokohdassa. Tiiviiden varmistamiseksi kanavien liittokohdissa liittokset teipataan umpeen ennen liitinpannan asentamista, kuten kuvassa 2.7. Tässä työssä ei kanavistossa havaittu vuotoja sillä painetasolla, jolla tarkistus toteutettiin.



Kuva 2.5: Paineenmittausyhteet.



Kuva 2.6: Tiiviystarkistus.



Kuva 2.7: Tiivistys.

3 MITTALAITTEET

Puhaltimen mittaukseen tarvittavia mittalaitteita ovat digitaalinen kosteus- ja lämpömittari ilman kosteuden mittaukseen, pitot-putki paine-eromittareineen, termoaanometri sekä ilmavirran mittauslaite tilavuusvirran määrittämiseen, barometri mittaustilan paineen mittaamiseen, painemittari staattisen paineen mittaamiseen kanaviston imu- ja painepuolella sekä termoelementti digitaalilämpömittareineen lämpötilan mittaamiseen kanaviston poistoaukolla. Alla olevassa kuvassa esitetään mittausjärjestely aksiaalipuhaltimen suoritusarvojen mittaamiseksi. Kanaviston imuaukko jää kuvassa vasemmalle, jonka jälkeen on ilmavirran mittauslaite, puhallin ja oikealla kanaviston poistoaukolla säätöpelti.



Kuva 3.1: Mittausjärjestely aksiaalipuhaltimen suoritusarvojen mittaamiseksi.

3.1 Ilman kosteuden mittaus kapasitiivisella anturilla

Ilman kosteuden mittaus voidaan toteuttaa psykrometrilla, hiushygrometrilla tai sähköisellä mittarilla. Psykrometrilla mitataan kuivaa ja märkää lämpötilaa, kun taas hiushygrometrilla ja kapasitiivisella anturilla suhteellista kosteutta (Ilmastointitekniikka osa 2,

173). Tässä työssä ilman kosteuden mittaukseen käytetään Vaisalan digitaalista kosteus- ja lämpömittaria HMI 31 (kuva 3.2). Tunto-osana kosteusmittauksessa käytetään Vaisalan Humicap 1638 HM kapasitiivista anturia ja lämpötilamittauksessa PT-100 - vastusanturia.



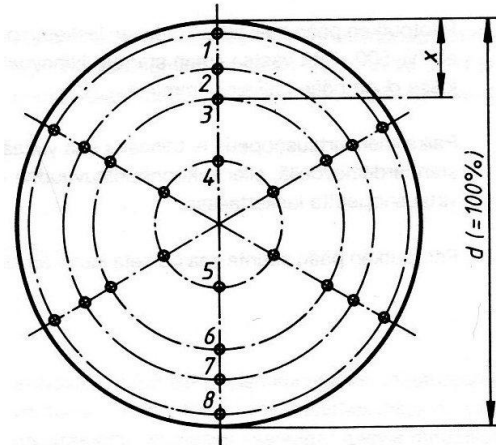
Kuva 3.2: Vaisalan digitaalinen kosteus- ja lämpömittari. Oikealla kapasitiivisen ja PT-100 -anturin sisältävä mittapäää HMP 31 UT.

3.2 Dynaamisen paineen mittaus pitot-putkella

Tilavuusvirran määrittämiseksi voidaan pitot-putkella mitata virtauksen aiheuttamaa dynaamista painetta. Suomen standardisoimisliiton julkaiseman SFS -käsikirjan (Ilmastointitekniikka osa 1, 133) mukaan mittausleikkaus pitot-putkimittausta varten pyritään sijoittamaan mille tahansa kanavaosalle, jossa virtaus on aksiaalinen, symmetrinen ja vailla pyörivää liikettä. Kanavaosan, jossa mittausleikkaus tehdään, tulee olla suora, vakiopoikkipintainen, pituudeltaan vähintään kaksi kertaa kanavan halkaisija, eikä siinä saisi olla virtausta häiritseviä esteitä. Mittausleikkaus sijoitetaan tälle mittausosuudelle kuvan 2.5 esittämään kohtaan minimietäisyyksiä noudattaen.

Suomen standardisoimisliiton julkaisema SFS -käsikirja (Ilmastointitekniikka osa 1, 134) määrittelee myös, että mittauspisteet valitaan vähintään kolmelta tasavälein sijaitsevalta halkaisijalta niin sanotun log-linear -menetelmän mukaisesti kuvan 3.3 osoittamalla tavalla. Kuusi pistettä halkaisijalla johtaa riittävään tarkkuuteen vain tasaisella

virtauksella. Epätasaisuuden lisääntyessä on käytettävä kahdeksaa tai kymmentä pistettä kultakin halkaisijalta. Jos paikalliset esteet tekevät kolmen halkaisijan käytön mahdottomaksi, voidaan käyttää kahta toisiaan vastaan kohtisuorassa olevaa halkaisijaa ja kymmentä pistettä kummaltakin, kuten tässä työssä.



Kuva 3.3: Mittauspisteiden sijainti pyöreässä kanavassa log-linear -menetelmän mukaan. (Ibid.)

Taulukkoon 3.1 on kirjattu mittauspisteiden etäisyydet kanavan seinästä prosentteina Suomen standardisoimisliiton SFS -käsikirjan (Ibid.) mukaan, kun n on mittauspisteiden lukumäärä ja x_n on mittauspisteen etäisyys kanavan seinästä.

Taulukko 3.1: Pitot-putkimittauksessa mittauspisteiden etäisyydet kanavan seinästä prosentteina log-linear -menetelmän mukaan. (Ibid.)

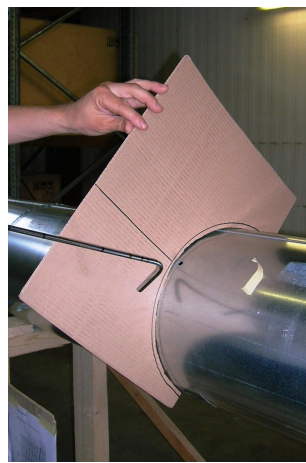
Etäisyys kanavan seinästä [%]										
n	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}
6	3,2	13,5	32,1	67,9	86,5	96,8				
8	2,1	11,7	18,4	34,5	65,5	81,6	88,3	97,9		
10	1,9	7,7	15,3	21,7	36,1	63,9	78,3	84,7	92,3	98,1

Kanavan halkaisijalle $D = 315$ mm on seuraavaan taulukkoon 3.2 laskettu pitot-putken pään mittausetäisyydet kanavan sisäseinästä millimetreinä taulukon 3.1 mukaan.

Taulukko 3.2: Pitot-putkimittauksessa mittauspisteiden etäisyydet kanavan sisäseinästä millimetreinä log-linear -menetelmän mukaan, kun kanavan halkaisija on $D = 315$ mm.

Etäisyys kanavan sisäseinästä [mm]										
n	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}
6	10,1	42,5	101,1	213,9	272,5	304,9				
8	6,6	36,9	58,0	108,7	206,3	257,0	287,1	308,4		
10	6,0	24,2	48,2	68,4	113,7	201,3	246,6	266,8	290,7	309,0

Mitattaessa virtauksen dynaamista painetta pitot-putkella tulee huomioida, että pitot-putken pää on suoraan virtausta vastaan. Pitot-putken tulee myös olla kohtisuorassa kanavaan nähden, jotta kaikki tulokset saadaan mitattua samalta halkaisijalta. Tässä työssä käytettiin kuvan 3.4 mukaista apuvälinettä varmistamaan pitot-putken kohtisuoruus kanavaan nähden. Pahville piirretty kanavan pinnan normaali kohdistetaan pitot-putken mittausräin kohdalle ja pitot-putki pidetään normaalin suuntaisena mittauksen aikana.

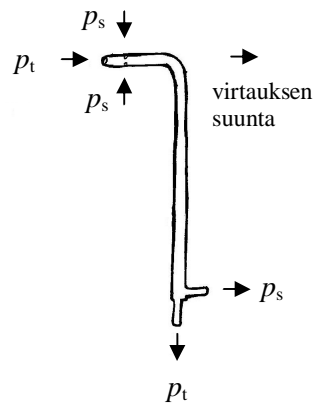


Kuva 3.4: Pitot-putkimittaus.

Päästään varren kanssa suoraan kulmaan taivutettu pitot-putki koostuu kahdesta sisäkäisestä ohuesta putkesta. Jos pitot-putken mittauspää kohdistetaan suoraan virtausta vastaan, vaikuttaa mittauspään suuntaisena virtaavan kaasun absoluuttinen staattinen paine p_{sa} sivuaukkojen kautta ulkoputkeen (kuva 3.5). Yhdistämällä vastaava liitin pai-

ne-eromittariin, saadaan mitatuksi virtaavan kaasun ja ilmakehän välinen staattinen paine-ero. (Ilmastointitekniikka osa 1, 150)

$$p_s = p_{sa} - p_a \quad (4)$$



Kuva 3.5: Pitot-putken toimintaperiaate.

Putken päässä olevaan reikään vaikuttaa staattisen paineen lisäksi myös virtaavan kaasun liike-energiaa vastaava dynaaminen paine p_d eli yhteensä absoluuttinen kokonaispaine

$$p_{ta} = p_{sa} + p_d \quad (5)$$

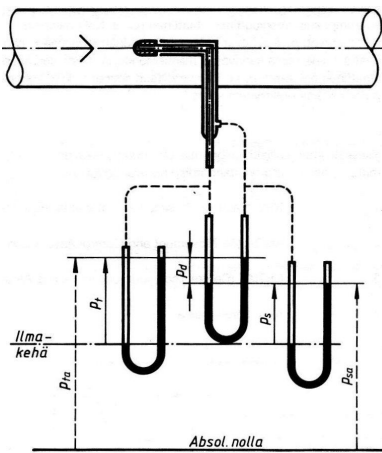
Yhdistämällä sisäputken liitin paine-eromittariin, saadaan kokonaispaineen ja ilmakehän välinen paine-ero

$$p_t = p_{ta} - p_a \quad (6)$$

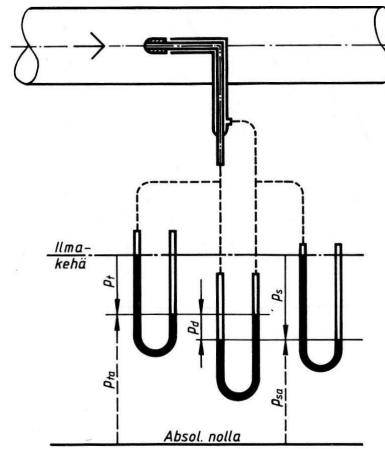
Yhdistämällä molemmat liittimet paine-eromittariin, ilmaisee se kaasun dynaamisen paineen

$$p_d = p_{ta} - p_{sa} \cdot \quad (7)$$

Kuvat 3.6 ja 3.7 havainnollistavat mittauksia ja painesuhteita sekä yli- että alipaineisessa kanavassa.



Kuva 3.6: Pitot-putki ylipaineisessa kanavassa. (Ilmastointiteknikka osa 1, 151)



Kuva 3.7: Pitot-putki alipaineisessa kanavassa. (Ibid.)

Dynaaminen paine voidaan kirjoittaa myös muotoon

$$p_d = \frac{1}{2} \rho_x w_x^2 = p_{ta} - p_{sa} \cdot \quad (8)$$

Kussakin mittauspisteessä mitatusta dynaamisesta paineesta lasketaan paikallinen virtausnopeus pitot-putkimittausleikkauksessa seuraavasti:

$$w_x = \frac{\sqrt{2p_d}}{\rho_x} \cdot \quad (9)$$

Jos kokoonpuristuminen huomioidaan laskettaessa, tiheys ρ_x saadaan yhtälöstä (3), muulloin $\rho_x = \rho_0$. Mittauskanavan lämpötilan oletetaan olevan vakio puhaltimen asti,

jolloin $t_0 = t_3 = t_1$. Tässä tapauksessa tiheytenä käytetään ilman tiheyttä imuaukon läheisyydessä ρ_0 , koska pitot-putkimittausleikkaus on niin lähellä kanaviston imuaukkoa.

Keskimääräinen virtausnopeus w_m lasketaan paikallisten nopeuksien aritmeettisena keskiarvona eli

$$w_m = \frac{w_1 + w_2 + \dots + w_n}{n}, \quad (10)$$

n :n ollessa mittauspisteiden lukumäärä. (Ibid.)

Tässä työssä pitot-putki (kuva 3.8) yhdistetään TSI:n DP-Calc 8702 mikromanometriin (kuva 3.9), jonka näytöstä saadaan luettua virtauksen aiheuttama dynaaminen paine p_d . Mitattaessa dynaamista painetta pitot-putkella tulee huomioida, että mikromanometrin resoluutio on 1 Pa. Kun paine on samaa suuruusluokkaa kuin manometrin resoluutio, mittauksen epävarmuus kasvaa. Pienillä dynaamisilla paineilla myös mahdolliset vuodot kanavistossa kasvattavat mittaustuloksen epävarmuutta.



Kuva 3.8: Pitot-putki.



Kuva 3.9: TSI DP-Calc 8702 mikromanometri.

3.3 Virtausnopeuden mittaus termoanemometrilla

Virtausnopeuden ja lämpötilan mittaus termoanemometrilla perustuu anturin jäähtymiseen. Vastuksen läpi johdettava sähkövirta lämmittää vastuksen ympäristöä korkeam-

paan lämpötilaan. Stationaaritilassa vastuksen lämpötila asettuu tasolle, jossa sähkövirran tuoma teho siirtyy lämmön konvektion, johtumisen sekä säteilyn vaikutuksesta ympäristöön. Ilmavirtaus vastuksen ympärillä tehostaa lämmönsiirtoa. Vastuksen lämmittämiseen tarvittava sähkövirta on verrannollinen vastusta jäähdyttävään virtausnopeuteen. (Backman 2006, 8) Tässä työssä käytetään TSI:n Velocicalc 8345 termoanemometriä (kuva 3.10), joka mittaa ilmannopecta ja lämpötilaa sekä laskee tilavuusvirran.



Kuva 3.10: TSI Velocicalc 8345 termoanemometri.

3.4 Paine-eron mittaus ilmavirran mittauslaitteella

Haltonin MSD -ilmavirran mittauslaitteella määritetään tilavuusvirta kanavistossa. Mittauslaite perustuu paine-eroon, jonka kanaviston ilmavirta aiheuttaa laitteen etu- ja taka-reunassa olevien mittaussiipien välille. Tilavuusvirta määritetään kahden ristikkäisen mittauselimen havaitseman keskimääräisen paine-eron perusteella. Mittauselinten mittausputket liitetään HK Instrumentsin kalvotoimiseen DPG600 paine-eromittariin (kuva 3.11) kuvan 3.12 mukaisesti. Tilavuusvirta lasketaan yhtälöllä

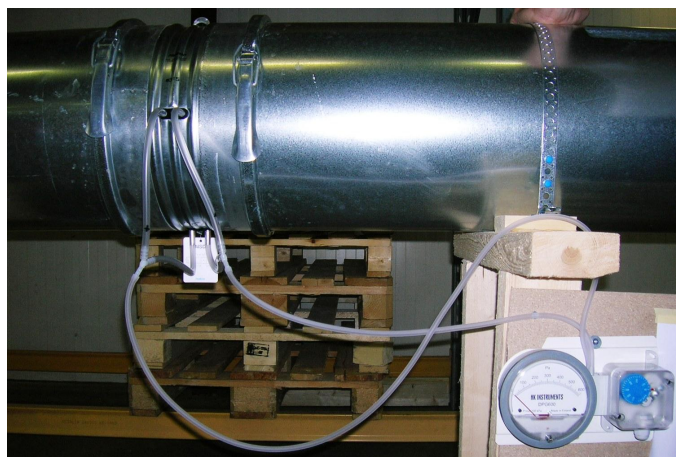
$$q_v = k \sqrt{\Delta p}, \quad (11)$$

jossa kerroin k saadaan laitteen tuote-esitteestä. Kanavalle, jonka halkaisija $D = 315$ mm, $k = 72,3$. Paine-eromittarin lukematarkkuus aiheuttaa mittausepävarmuutta tilavuusvirran mittaukseen MSD -ilmavirran mittauslaitteella.

Haltonin ilmavirran mittauslaite hankittiin vertailun vuoksi ja sillä asiakas voi tämän työn jälkeen mitata puhaltimien tilavuusvirtaa.



Kuva 3.11: HK Instruments DPG600 paine-eromittari.



Kuva 3.12: Ilmavirran mittauslaite MSD yhdistettynä paine-eromittariin DPG600.

3.5 Staattisen paineen mittaus barometrilla ja painemittarilla

Suomen säätöteknillisen seuran Paine ja virtaus -julkaisussa Arto Hännisen kuvauksen mukaan paineen ja paine-eron mittaaminen ovat paineen aiheuttaman, tunnettuun pinta-alaan vaikuttavan voiman mittaamista tai paineen mittauselimessä aiheuttaman siirtymän vaikutusten muuttamista mitattavaan paineeseen verrannolliseksi mittaustuloksek-

si. Voimatasapainoon perustuvissa paineenlähettimissä käytetään mittauselimenä pöimputkea, bourdonputkea tai kalvoa. Siirtymäperiaatteella toimivassa lähettimessä paine aiheuttaa kapasitanssin, induktanssin tai resistanssin muutoksena havaittavan siirtymän. Siirtymä on verrannollinen paineeseen tai paine-eroon. (Paine ja virtaus, 49)

Mittaustilan staattinen paine p_a mitataan barometrillä (kuva 3.13). Barometrin toiminta perustuu bourdonputkiperiaatteeseen. Paineen suuruutta näyttävän osoittimen siirtymä on verrannollinen ympäristön paineeseen, joka suurentuessaan suoristaa ja pienentyessä käyristää putkea. Barometri antaa paineen elohopeamillimetreinä, joka muunnetaan pascalleiksi suhteella $760 \text{ mmHg} = 101,325 \text{ kPa}$.



Kuva 3.13: Barometri.

Staattista painetta puhaltimen imu- ja painepuolella kanavassa mitataan sekä TSI:n DP-
Calc 8702 manometrillä että Beamex Model PC12 -painekalibraattorilla (kuva 3.14),
jota käytetään painemittarina. Painemittari liitetään rengasputkeen, joka yhdistää neljä
kanavaan symmetrisesti sijoitettua paineenmittausyhdettä. Koska Beamex-painemittari
ei nollakohdan ryömintänsä takia antanut luotettavia tuloksia, suoritusarvojen lasken-
taan käytettiin vain manometrillä mitattuja staattisen paineen tuloksia.



Kuva 3.14: Beamex PC12 painemittari.

3.6 Lämpötilan mittaus termoelementillä tai vastusanturilla

Lämpötilan mittaukset toteutetaan joko termoelementillä tai vastusanturilla kanavassa puhaltimen painepuolella. Kalliomäen (1981, 75) mukaan mitattaessa lämpötilaa vastuslämpötila-anturilla käytetään hyväksi metallin sähkönjohtavuuden riippuvuutta lämpötilasta. Varsinainen tunto-osa on ohut metallilanka, jonka vastus mitataan sen päihin liitetyn vastuslämpömittarin tai vastusmittarin avulla. Vastuksen suuruus muuttuu lämpötilan funktiona.

Mittatekniikan keskuksen julkaisun (Weckström 2005, 25) mukaan termoelementti on laajasti käytössä oleva anturityyppi lämpötilan mittauksissa. Sen yksinkertaisuus, luotettavuus sekä halpa hinta ovat kilpailukykyisiä ominaisuuksia moneen sovellukseen. Tässä työssä käytetään k-tyyppin termoelementtiä (kuva 3.15) lämpötilan mittaukseen puhaltimen painepuolella kanaviston poistoaukolla. Mittaus toteutetaan kanaviston poistoaukolla, jotta vältetään tekemästä kanavaan paineenmittausta häiritsevää mittausleikkausta termoelementtiä varten. Termoelementin käyttöön tarvitaan digitaalilämpömittari, jonka resoluutio vaikuttaa mittausepävarmuuteen.



Kuva 3.15: TES 1312A -mittalaite ja k-tyypin termoelementti.

4 MITTALAITTEIDEN KALIBROINTI

Kalibrointia voidaan lyhyesti kuvata toimintana, jossa testattavaa laitetta verrataan tunnettuun viitearvoon. Tärkein syy kalibrointiin on, että parhaissakin laitteissa esiintyy ryömintää ja ne menettävät ajan mittaan kyvyn tarkkoihin mittauksiin. Mittalaitteen kalibroinnilla varmistetaan ja osoitetaan, että se toimii niissä mittaustarkkuusrajoissa jotka sille on määritelty. (Beamex 2010)

4.1 Kapasitiivisen anturin kalibrointi

Kapasitiivisen anturin kalibrointiin käytetään Vaisalan HMK 15 kosteuskalibraattoria (kuva 4.1). Kalibrointimenetelmä perustuu kyllästettyjen suolaliuosten aiheuttaman vesihöyryn paineeseen. Suolaliuosastiat ovat kuvan 4.1 yläreunassa. Mittaustilan lämpötilaa mitataan kuvan keskellä olevalla lämpömittarilla. Lappeenrannan teknillisen yliopiston laboratoriotyöntekijän suorittamassa kalibroinnissa kalibrointi toteutettiin magnesiumkloridi- ($MgCl_2$) sekä natriumkloridisuolaliuoksissa ($NaCl$).



Kuva 4.1: Vaisalan HMK 15 kosteuskalibraattori kapasitiivisen anturin kalibrointiin.

Ennen kalibroinnin aloittamista anturin lämpötilan annetaan tasautua samaksi ympäristön ja kalibrointilaitteen lämpötilan kanssa vähintään 30 minuuttia. Lämpötilojen tasautumisen jälkeen anturi liitetään näyttölaitteeseen, poistetaan anturisuojus ja irrotetaan vaippaputki (kuva 4.2). Anturi asetetaan kalibrointilaitteen $MgCl_2$ -pulloon, jossa suh-

teellinen kosteus on 33 %. Kalibrointilaitteen kannesta luetaan vallitsevaa lämpötilaa vastaava suhteellisen kosteuden arvo ja viiden minuutin kuluttua säädetään kuivasäätö-
tasaimella mittarin lukemaksi taulukon antama arvo.



Kuva 4.2: Vaisalan Humicap 1638 HM kosteusanturi, josta on irrotettu anturisuojus ja vaippa-
putki.

Seuraavaksi anturi siirretään NaCl-pulloon, jossa suhteellinen kosteus on 75 %, luetaan taulukosta vallitsevaa lämpötilaa vastaava suhteellisen kosteuden arvo ja viiden minuutin kuluttua säädetään kosteasäätötasaimella mittarin lukemaksi taulukon antama arvo. Koska säädöt vaikuttavat toisiinsa, kalibroinnit toistetaan, kunnes suhteellisen kosteuden arvot ovat samat taulukon antamien arvojen kanssa anturia pullosta toiseen siirrettäessä.

4.2 Painemittarin kalibrointi

Kalibroitaessa painemittaria, painemittari ja -kalibraattori yhdistetään toisiinsa niin, että niiden mittaamaa painetta voidaan säätää. Painekalibraattorina käytetään Beamex MC5-monitoimikalibraattoria (kuva 4.3). Pitot-putkimittauksessa käytettävä mikromanometri sekä painemittarina käytettävä Beamex PC12 -painekalibraattori kalibroidaan välille 0 - 2000 Pa. Kalibrointi tehdään molempiin suuntiin, alemmasta paineesta ylempään ja takaisin, sillä antureissa voi esiintyä muutostilanteessa hystereesiä.

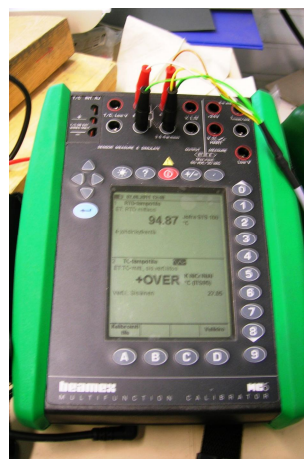
4.3 Termoelementin kalibrointi

Termoelementti voidaan kalibroida hauteessa. Hauteita löytyy eri lämpötila-alueille, esimerkiksi alkoholihaude -80°C tai $-30^{\circ}\text{C} \dots 10^{\circ}\text{C}$, vesihaude $10^{\circ}\text{C} \dots 95^{\circ}\text{C}$, öljyhaude $80^{\circ}\text{C} \dots 300^{\circ}\text{C}$ ja suolahaude $250^{\circ}\text{C} \dots 600^{\circ}\text{C}$ (Weckström 2005, 97).

Termoelementtiä kalibroitaessa koko mittausketju kalibroidaan. TES 1312A -mittalaitteen k-tyyppin termoelementti sijoitetaan Frigomix -kalibraattorin vesihauteeseen (kuva 4.4), jossa kiertopumpun virtaus parantaa lämmönsiirtoa ja ylläpitää tasaista lämpötilajakaumaa. Kalibraattorin ohjauspaneelista asetetaan haluttu lämpötila, jonka laitteisto pyrkii saavuttamaan joko sähkövastuksen tai kylmälaitteen avulla. Beamex MC5 -kalibraattorista (kuva 4.5) luetaan vesihauteeseen sijoitetun PT-100 -lämpötila-anturin ilmoittama lukema.



Kuva 4.4: Frigomix -kalibraattorin vesihaude termoelementin kalibrointiin.



Kuva 4.5: Beamex MC5 monitoimikalibraattori termoelementin kalibrointiin.

Kalibraattorin ja kalibroitavan mittarin lämpötilat kirjataan ylös ja esitetään mittauspöytäkirjassa liitteessä 3. Mitatut arvot sijoitetaan kaavioon, jossa vaaka-akselilla on termoelementin lämpötila ja pystyakselilla kalibraattorin lämpötila. Pisteiden kautta sovitetaan suora pienemmän neliösumman menetelmällä. Kalibrointisovitteeksi saadaan

$$t_{\text{korjattu}} = 1,02 t_{\text{mitattu}} - 0,64 . \quad (14)$$

5 SUORITUSARVOJEN LASKENTA

Puhaltimien suoritusarvoista tuotetaan tunnuskenttä, joka koostuu puhallinkäyristä. Käyrät esittävät puhaltimen toimintaa tietyllä pyörimisnopeudella ja siipikulmalla. Tunnuskentän laskentaa varten määritetään tilavuusvirta sekä puhaltimen kokonaispaineennousu kymmenellä eri tilavuusvirtaa säättävän säätöpellin asennolla. Mittaustulokset esitetään liitteen 4 mittauspöytäkirjassa. Mittaustuloksista lasketut arvot muunnetaan standarditiheyttä $1,20 \text{ kg/m}^3$ vastaaviksi. Kokonaispaineennousu sijoitetaan kuvaajan y-akselille ja tilavuusvirta x-akselille.

5.1 Ilman tiheyden laskenta

Ensimmäiselle mittaukselle, jolloin säätöpelti on täysin auki, lasketaan aluksi ilman tiheys imuaukon läheisyydessä. Kosteus- ja lämpömittarilla mitatulla arvolla $t_0 = 23,8$ °C saadaan vesihöyryn h,s -piirroksesta vesihöyryn osapaineelle kyllästystilassa arvoksi $p'_h = 2900 \text{ Pa}$. Vesihöyryn osapaine lasketaan yhtälöstä (1), kun suhteellinen kosteus $\varphi = 48,6 \%$ ja tulokseksi saadaan $p_h = 1409 \text{ Pa}$. Ilman tiheydeksi imuaukon läheisyydessä saadaan yhtälöstä (2) $\rho_0 = 1,19 \text{ kg/m}^3$, joka säilyy lähes muuttumattomana mittausten ajan.

5.2 Tilavuusvirran laskenta

Virtausnopeus kussakin mittauspisteessä saadaan pitot-putkella mitatusta dynaamisesta paineesta yhtälöllä (9). Keskimääräinen virtausnopeus pitot-putkimittausleikkauksessa lasketaan yhtälön (10) mukaan.

Massavirralle pitot-putkimittausleikkauksessa voidaan laskea arvot yhtälöstä

$$q_m = \rho_x w_m A = \rho_x w_m \frac{\pi}{4} D^2 \quad (15)$$

pitot-putkella ja termoaanemometrillä mitatuista virtausnopeuksista. Oletetaan, että kanavisto ei vuoda, jolloin jatkuvuusyhtälö on voimassa ja massavirta säilyy vakiona. Puhaltimen tilavuusvirta saadaan laskettua massavirran avulla yhtälöstä

$$q_{v1} = \frac{q_m}{\rho_1}, \quad (16)$$

jossa ilman tiheys puhaltimen imuaukolla ρ_1 saadaan yhtälöstä

$$\rho_1 = \rho_0 \frac{p_a + p_{t1}}{p_a}. \quad (17)$$

Yhtälössä (17) p_{t1} on kokonaispaine puhaltimen imuaukolla. Ensimmäisellä mittauksella tilavuusvirran suuruudeksi pitot-putkella saadaan $q_{v1} = 1,07 \text{ m}^3/\text{s}$ ja termoaanometrillä $q_{v1} = 1,02 \text{ m}^3/\text{s}$. Ilmavirran mittaustuloksella saadaan tilavuusvirran arvoksi yhtälöstä (11) $q_{v1} = 1,00 \text{ m}^3/\text{s}$. Liitteessä 5 esitetään tilavuusvirran laskennan tulokset välivaiheineen. Liitteen 5 taulukossa punaisella merkityt suureet kuvaavat mittaustuloksia.

5.3 Puhaltimen kokonaispaineen laskenta

Kokonaispaineen määrittämiseen tarvittavat puhaltimen imu- ja paineaukon kokonaispaineet p_{t1} ja p_{t2} saadaan puhaltimen imu- ja painepuolella mitattujen staattisten paineiden p_{s3} ja p_{s4} avulla yhtälöstä

$$p_t = p_{t2} - p_{t1} = (p_{s4} + p_{d4} + \Delta p_{24}) - (p_{s3} + p_{d3} - \Delta p_{31}), \quad (18)$$

jossa dynaamiset paineet puhaltimen imu- ja painepuolella p_{d3} ja p_{d4} saadaan jatkuvuusyhtälön avulla alla olevasta yhtälöstä

$$p_{dx} = \frac{1}{2} \rho_x w_m^2 = \frac{8 q_m^2}{\pi^2 \rho_x D^4}. \quad (19)$$

Tiheydelle kyseessä olevassa mittauspisteessä lasketaan arvo yhtälöstä (3) staattisen paineen p_{sx} ja lämpötilan t_x avulla. (Ilmastointitekniikka osa 1, 128)

Yhtälössä (18) esiintyvät paineenmittausleikkausten ja puhaltimien välisissä kanavissa (kuva 2.4) kitkan johdosta syntyvät painehäviöt Δp_{31} ja Δp_{24} voidaan ottaa huo-

mioon puhaltimen painetta lisäävinä tekijöinä. (Ilmastointitekniikka osa 1, 140) Painehäviöt lasketaan yhtälöstä

$$\Delta p = \lambda \frac{l}{D} \frac{1}{2} \rho_x w_m^2 = \lambda \frac{l}{D} p_{dx}, \quad (20)$$

jossa l on kanavan pituus mittausleikkauksen ja puhaltimen välillä sekä λ saadaan yhtälöstä

$$\lambda = 0,005 + 0,42 \operatorname{Re}^{-0,3}. \quad (21)$$

Reynoldsin luku Re saadaan jatkuvuusyhtälön avulla yhtälöstä

$$\operatorname{Re} = \frac{\rho_x w_m D}{\mu} = \frac{4 q_m}{\pi D \mu}, \quad (22)$$

jossa dynaaminen viskositeetti μ on lämpötilasta riippuva suure. Sen arvoja löytyy alla olevasta taulukosta (White 2003, 810).

Taulukko 5.1: Tiheys, dynaaminen sekä kinemaattinen viskositeetti ilmalle lämpötilan funktiona paineessa 101,325 kPa. (White 2003, 810)

T [°C]	ρ [kg/m ³]	μ [Ns/m ²]	ν [m ² /s]
-40	1,52	1,51 E-5	0,99 E-5
0	1,29	1,71 E-5	1,33 E-5
20	1,20	1,80 E-5	1,50 E-5
50	1,09	1,95 E-5	1,79 E-5
100	0,946	2,17 E-5	2,30 E-5
150	0,835	2,38 E-5	2,85 E-5
200	0,746	2,57 E-5	3,45 E-5
250	0,675	2,75 E-5	4,08 E-5
300	0,616	2,93 E-5	4,75 E-5
400	0,525	3,25 E-5	6,20 E-5
500	0,457	3,55 E-5	7,77 E-5

Kun tiedetään mitattujen staattisten paineiden lisäksi lasketut dynaamiset paineet sekä kitkapainehäviöt, lasketaan puhaltimen kokonaispaine. Kokonaispainetta laskettaessa on huomioitava, että staattinen paine puhaltimen imupuolella p_{s3} on arvoltaan negatiivinen alipaineen takia. Ensimmäisellä mittauksella staattiseksi alipaineeksi puhaltimen imupuolella saadaan -143 Pa ja ylipaineeksi painepuolella 54 Pa. Yhtälöllä (18) kokonaispaineeksi saadaan 211 Pa. Puhaltimen kokonaispaineen laskentatulokset esitetään liitteen 6 taulukossa, johon on punaisella merkitty mittaustulokset..

5.4 Kokoonpuristuminen

Puhaltimissa virtaavaa ilmaa voidaan Seppäsen (1988, 121) mukaan pitää kokoonpuristumattomana pien- ja keskipaine puhaltimissa. Sen sijaan suurpaine puhaltimissa tiheyden muutokset tulisi ottaa huomioon. Suomen standardisoimisliiton julkaiseman SFS - käsikirjan (Ilmastointitekniikka osa 1, 118) mukaan puhaltimen suoritusarvoja laskettaessa voidaan ilman kokoonpuristuminen puhaltimessa jättää huomiotta, jos painesuhde $\pi \leq 1,03$. Tätä vastaa $p_t \approx 3$ kPa standarditiheydellä. Painesuhde on puhaltimen paine- ja imuaukon absoluuttisten kokonaispaineiden suhde, joka saadaan yhtälöstä

$$\pi = \frac{P_{ta2}}{P_{ta1}} = \frac{P_{t2} + P_a}{P_{t1} + P_a}. \quad (23)$$

Ensimmäisen mittauksen painesuhdeksi edellä olevalla yhtälöllä saadaan $\pi = 1,00$, jolloin ilmaa voidaan pitää kokoonpuristumattomana. Laskuissa kokoonpuristumisen huomiotta jättäminen merkitsee, että kokoonpuristuvuuskerroin $k_p = 1$, lämpötila on vakio kaikissa mittauskanavan leikkauksissa $t_x = t_0$ samoin kuin tiheys $\rho_x = \rho_0$.

Jos ilman kokoonpuristuminen huomioidaan, lämpötilan mittausta toteutetaan sekä imuaukon läheisyydessä t_0 että mittauskanavassa puhaltimen jälkeen t_4 . Mittauskanavan lämpötilaa voidaan yleensä pitää vakiona puhaltimeen asti, jolloin $t_0 = t_3 = t_1$. Puhaltimen suoritusarvoja laskettaessa, saadaan kokoonpuristumiskerroin yhtälöstä

$$k_p = \frac{z \log \pi}{\log [1 + z (\pi - 1)]}, \quad (24)$$

kun tunnetaan painesuhde π ja aputermi z . Standardi DIN 24163 korvaa kokoonpuristumiskertoimen k_p käyttämällä laskuissa tiheyden ρ_1 sijasta keskimääräistä tiheyttä ρ_m , jolloin pätee riittävän tarkasti

$$\frac{\rho_1}{\rho_m} \approx k_p, \quad (25)$$

jossa keskimääräinen tiheys ρ_m saadaan puhaltimen imu- ja paineaukolla vallitsevien tiheyksien keskiarvona yhtälöstä

$$\rho_m = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2}. \quad (26)$$

Ilman tiheydelle puhaltimen imuaukolla pätee yhtälö (17), kun sekä puhaltimen imu- että painepuoli ovat liitetty kanavaan. Puolestaan ilman tiheys puhaltimen paineaukolla on likimain sama kuin puhaltimen imupuolella mittausleikkauksessa 4. (Ilmastointitekniikka osa 1, 117) Tällöin $\rho_2 \approx \rho_4$ ja tiheyden arvo saadaan yhtälöstä (3), kun tunnetaan staattinen paine ja lämpötila mittausleikkauksessa 4.

5.5 Suoritusarvojen muuntaminen

Mitatulle puhaltimella saadut suoritusarvot voidaan muuntaa vastaamaan jotakin mittauksesta poikkeavaa pyörimisnopeutta n , tiheyttä ρ tai puhallinsuuruutta D . Mittaustulokset muunnetaan yleensä vastaamaan standarditiheyttä $1,20 \text{ kg/m}^3$ (Ilmastointitekniikka osa 1, 180). Kun ilman kokoonpuristuvuutta ei tarvitse ottaa huomioon, käytetään seuraavia laskentayhtälöitä, joissa pilkulla merkitään muunnettuja suureita (Ilmastointitekniikka osa 1, 141):

$$q'_{v1} = q_{v1} \left(\frac{n'}{n} \right) \left(\frac{D'}{D} \right)^3 \quad (27)$$

ja

$$p'_t = p_t \left(\frac{n'}{n} \right)^2 \left(\frac{D'}{D} \right)^2 \left(\frac{\rho'_1}{\rho_1} \right). \quad (28)$$

Otettaessa huomioon ilman kokoonpuristuvuus, puhaltimen suoritusarvoja muunnettaessa pätee tilavuusvirralle yhtälö

$$q'_{v1} = q_{v1} \left(\frac{n'}{n} \right) \left(\frac{D'}{D} \right)^3 \left(\frac{k_p}{k'_p} \right), \quad (29)$$

jossa kokoonpuristuvuuskerroin voidaan korvata yhtälön (25) mukaan keskimääräisellä tiheydellä muotoon

$$q'_{v1} = q_{v1} \left(\frac{n'}{n} \right) \left(\frac{D'}{D} \right)^3 \left(\frac{\rho_1}{\rho'_1} \right) \left(\frac{\rho'_m}{\rho_m} \right). \quad (30)$$

Puhaltimen kokonaispaine saadaan muunnettua yhtälöllä

$$p'_t = p_t \left(\frac{n'}{n} \right)^2 \left(\frac{D'}{D} \right)^2 \left(\frac{\rho'_1}{\rho_1} \right) \left(\frac{k_p}{k'_p} \right), \quad (31)$$

joka saadaan korvaamalla kokoonpuristuvuuskerroin yhtälöllä (25) muotoon

$$p'_t = p_t \left(\frac{n'}{n} \right)^2 \left(\frac{D'}{D} \right)^2 \left(\frac{\rho'_m}{\rho_m} \right). \quad (32)$$

Standarditiheyttä $1,20 \text{ kg/m}^3$ vastaamaan muunnetut suoritusarvot esitetään liitteissä 5 sekä 6 tilavuusvirran ja kokonaispaineen laskentatulosten yhteydessä.

5.6 Mittausepävarmuuslaskenta

Mittalaitteet aiheuttavat mittaustuloksiin sekä systemaattista että satunnaista virhettä. Systemaattisen virheen voi kumota mittalaitteen kalibroinnilla. Satunnainen virhe laske-

taan mittaustulosten otoskeskiarvon \bar{x} ja otoskeskihajonnan s avulla. Parviaisen (2010, 45) mukaan luottamusväli on otoksen määräämä väli, jolle mittaustulos kuuluu valitulla todennäköisyydellä. Yleensä käytetään 95 %:n luottamusväliä. Otossuure noudattaa tällöin t-jakaumaa vapausastein $n-1$, kun n on mittaustulosten lukumäärä. Otoskeskiarvo lasketaan yhtälöstä

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (33)$$

ja otoskeskihajonta yhtälöstä

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}. \quad (34)$$

95 %:n luottamusväli johdetaan yhtälöstä

$$T = \frac{\bar{x} - \mu}{s/\sqrt{n}} \sim t(n-1) \quad (35)$$

$$-t_{0,975}(n-1) \leq \frac{\bar{x} - \mu}{s/\sqrt{n}} \leq t_{0,975}(n-1)$$

$$\bar{x} - t_{0,975}(n-1) \frac{s}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{x} + t_{0,975}(n-1) \frac{s}{\sqrt{n}}$$

$$\mu = \bar{x} \pm t_{0,975}(n-1) \frac{s}{\sqrt{n}}.$$

Arvoja vakiolle t vapausasteella $n-1$ löytyy Studentin t-jakaumasta (Råde & Westergren 2004, 472).

Koska tässä työssä epävarmuustarkastelu toteutetaan yksittäisille mittauksille, joiden keskihajontaa ei tunneta, ei edellä mainittua tapaa voida käyttää. Kun tunnetaan mittalaitteiden tarkkuus, voidaan laskea epävarmuus suurelle P toisella tavalla. Whiten

(2003, 45) mukaan suure P on n :n muuttujan $x_1 \dots x_n$ tulo, joista jokaisella muuttujalla on tietty epävarmuus $\delta x_1 \dots \delta x_n$. Kun jokaisen muuttujan epävarmuutta painotetaan sen eksponentilla n_n , saadaan P :lle kokonaisepävarmuus yhtälöstä

$$\frac{\delta P}{P} = \sqrt{\left(n_1 \frac{\delta x_1}{x_1}\right)^2 + \left(n_2 \frac{\delta x_2}{x_2}\right)^2 + \dots + \left(n_n \frac{\delta x_n}{x_n}\right)^2}. \quad (36)$$

5.6.1 Pitot-putki

Kun kyseessä on kokoonpuristumaton virtaus, pitot-putkella mitatulle tilavuusvirralle pätee yhtälö (16), joka supistuu muotoon

$$q_v = \frac{\pi D^2}{4 \rho_1} \sqrt{2p_d}, \quad (37)$$

koska $\rho_0 = \rho_x$ kokoonpuristumattomalle virtaukselle ja pitot-putkella mitatulle virtausnopeudelle pätee yhtälö (9). Koska virtaus on kanavistossa kokoonpuristumatonta, tiheys säilyy vakiona kaikissa mittausleikkauksissa ja saadaan yhtälöstä (2). Oletetaan, että ilman kosteus ei juuri vaikuta tiheyteen, jolloin tiheyden ρ_1 aiheuttamaa suhteellista virhettä voidaan tarkastella ideaalikaasun tilanyhtälön

$$p_a V = n R_u T \quad (38)$$

$$\frac{p_a}{\rho} = RT$$

$$\rho = \frac{p_a}{RT}$$

avulla, jossa R_u on yleinen kaasuvakio, R ilman kaasuvakio 287 J/kgK ja T lämpötila kelvineinä. Osittaisderivoimalla yhtälö (38) tiheyden epävarmuudeksi saadaan

$$\frac{\delta \rho_1}{\rho_1} = \sqrt{\left(\frac{\delta p_a}{p_a}\right)^2 + \left(-\frac{\delta T}{T}\right)^2}. \quad (39)$$

Ympäristön paineen virheeksi arvioidaan 0,025 mmHg barometrin lukematarkkuuden mukaan. Termoelementin kalibrointituloksista saadaan yhtälöllä (34) lämpötilan keskihajonnaksi 0,7 K. Kun keskihajonta kerrotaan kahdella, saadaan lämpötilan virheeksi 95 %:n luottamusvälillä 1,4 K. Kun yhtälöön (39) sijoitetaan virheet ympäristön paineelle ja lämpötilalle sekä ympäristön paine 762 mmHg ja lämpötila 24,5 °C = 297,5 K, saadaan tiheyden suhteelliseksi virheeksi 0,5 %.

Osittaisderivoimalla yhtälö (37) pitot-putkella mitatun tilavuusvirran epävarmuudeksi saadaan

$$\frac{\delta q_v}{q_v} = \sqrt{\left(\frac{1}{2} \frac{\delta p_d}{p_d}\right)^2 + \left(2 \frac{\delta D}{D}\right)^2 + \left(-\frac{\delta \rho_1}{\rho_1}\right)^2}. \quad (40)$$

Yhtälöllä (34) voidaan laskea mikromanometrin kalibrointituloksista dynaamisen paineen keskihajonnaksi 5,7 Pa. Kun keskihajonta kerrotaan kahdella, saadaan 95 %:n luottamusvälillä dynaamisen paineen virheeksi 11,4 Pa. Kanavan halkaisijan virheeksi arvioidaan 0,5 mm mitan lukematarkkuuden mukaan.

Tilavuusvirran epävarmuutta arvioidaan erikseen suurilla ja pienillä tilavuusvirroilla. Suurilla tilavuusvirroilla pitot-putkella mitattu dynaaminen paine on enemmän kuin 100 Pa. Dynaamisen paineen arvolla 100 Pa tilavuusvirran epävarmuudeksi saadaan yhtälöstä (40) 6,0 %. Pienillä tilavuusvirroilla dynaaminen paine on vähemmän kuin 25 Pa. Tällöin yhtälö (40) antaa tilavuusvirran epävarmuudeksi 23 %. Epävarmuus riippuu tilavuusvirran suuruudesta ja se on pienempi suurilla tilavuusvirran arvoilla. Epävarmuus kasvaa jyrkästi tilavuusvirran pienentyessä ja on 114 % tilavuusvirralla 0,23 m³/s, jolloin manometrin resoluutio on samaa luokkaa dynaamisen paineen kanssa.

5.6.2 Termoanemometri

Myös termoanemometrimitaukselle pätee tilavuusvirran yhtälö (16), joka kokoonpuristumattomalla virtauksella supistuu muotoon

$$q_v = \frac{\pi}{4} D^2 w_m. \quad (41)$$

Yhtälön (36) mukaan termoanemometrillä mitatun tilavuusvirran epävarmuudeksi saadaan

$$\frac{\delta q_v}{q_v} = \sqrt{\left(2 \frac{\delta D}{D}\right)^2 + \left(\frac{\delta w_m}{w_m}\right)^2}. \quad (41)$$

Termoanemometrin mittaamalla nopeudelle käyttöohje ilmoittaa mittausepävarmuudeksi 3,0 % mittaustuloksesta. Sijoittamalla yhtälöön (41) halkaisijan virhe 0,5 mm, halkaisijan pituus 315 mm sekä nopeuden suhteellinen virhe 3,0 %, saadaan termoanemometrillä mitatulle tilavuusvirralle kokonaisepävarmuudeksi 3,0 %. Termoanemometrin epävarmuus on pienempi kuin mihin pitot-putkella päästään suurimmillakaan tilavuusvirroilla. Termoanemometrin mittaustulokseen syntyy kuitenkin virhettä myös siitä, että se ilmoittaa nopeuden arvon tietyssä referenssitilassa ja tulokset pitäisi muuttaa vastaamaan vallitsevaa ilman tiheyttä.

Virtausnopeuden mittaaminen termoanemometrillä suunniteltiin suoritettavaksi kanaviston imuaukolla, mutta mittauksen osoittaututtua epäluotettavaksi, mittaaminen toteutettiin lopulta pitot-putken mittaustuloksesta. Yleensä termoanemometrimitaus ei ole kovin luotettava, varsinkaan jos se suoritetaan kanaviston imuaukolla, missä virtaus on epätaisaista. Tässä työssä termoanemometri osoittautui kuitenkin luotettavammaksi mittalaitteeksi kuin pitot-putki mitattaessa tilavuusvirtaa pienillä tilavuusvirroilla, jolloin pitot-putken mitaamat dynaamiset paineet alkoivat olla samaa luokkaa kuin manometrin resoluutio.

5.6.3 Ilmavirran mittauslaite

Haltonin ilmavirran mittauslaitteen paine-eroa mitanneelle paine-eromittarille epävarmuudeksi ilmoitetaan 2,0 % mittaustuloksesta. Osittaisderivoimalla yhtälö (11) saadaan Haltonin ilmavirran mittauslaitteella mitatulle tilavuusvirralle epävarmuudeksi

$$\frac{\delta q_v}{q_v} = \sqrt{\left(\frac{1}{2} \frac{\delta \Delta p}{\Delta p}\right)^2 + \left(\frac{\delta k}{k}\right)^2}, \quad (42)$$

jossa k on laitteen tuote-esitteestä saatava kerroin, jonka määritelmää tai epävarmuutta ei tunneta. Oletettavasti se kuitenkin vaikuttaa ilmavirran mittauslaitteella mitatun tilavuusvirran epävarmuuteen. Ilman kertoimen k epävarmuutta yhtälö (42) antaa tilavuusvirran epävarmuudeksi 1,0 %. Todellisuudessa tämä on kuitenkin suurempi kertoimen k takia. Kun arvioidaan kertoimen k suhteelliseksi virheeksi 4,0 %, yhtälö (42) antaa ilmavirran mittauslaitteen epävarmuudeksi 4,1 %. Kertoimen k epävarmuus siis hallitsee ilmavirran mittauslaitteen kokonaisepävarmuutta.

Tilavuusvirtamittauksista Haltonin ilmavirran mittauslaitteen mittausepävarmuus on samaa luokkaa termooanemometrin epävarmuuden kanssa sekä pitot-putken epävarmuuden kanssa suurilla tilavuusvirran arvoilla. Toisaalta ilmavirran mittauslaitteella tilavuusvirran laskentayhtälöön (11) kuuluu laitteen tuote-esitteestä saatava vakio, jolle ei tunneta tarkkaa epävarmuutta. Koska vakiolle ei ole selitystä tuote-esitteessä, se vaikuttaa tuloksen epävarmuuteen ei tunneta. Ilmavirran mittauslaitteella päästään kuitenkin lähelle samoja tuloksia kuin pitot-putki- ja termooanemometrimittauksella, joten se on tilavuusvirtamittauksessa suhteellisen luotettava ja laskennaltaan yksinkertainen. Pienillä tilavuusvirran arvoilla Haltonin ilmavirran mittauslaite ei tässä työssä osoittautunut enää toimivaksi, koska neljällä viimeisellä mittauksella, jolloin säätöpellin kulmat olivat 60 - 90°, paine-eromittari ei antanut tulosta.

5.6.4 Kokonaispaine

Kokoonpuristumattoman virtauksen ollessa kyseessä, puhaltimen kokonaispaineeseen vaikuttavat yhtälössä (18) vain mitatut staattiset paineet sekä painehäviötermit dynaamisten paineiden supistuessa pois, koska tiheys säilyy kanavistossa vakiona. Osittaisderivoimalla ensin yhtälö (20), saadaan painehäviökertoimien epävarmuudeksi 8,5 % yhtälöstä

$$\frac{\delta \Delta p}{\Delta p} = \sqrt{\left(\frac{\delta l}{l}\right)^2 + \left(-\frac{\delta D}{D}\right)^2 + \left(\frac{\delta \rho}{\rho}\right)^2 + \left(2\frac{\delta w_m}{w_m}\right)^2}, \quad (43)$$

kun oletetaan kitkakertoimen λ aiheuttaman epävarmuuden olevan merkityksetön.

Osittaisderivoimalla summalauseke (18) ilman dynaamisen paineen termejä, kokonaispaineen epävarmuudeksi saadaan

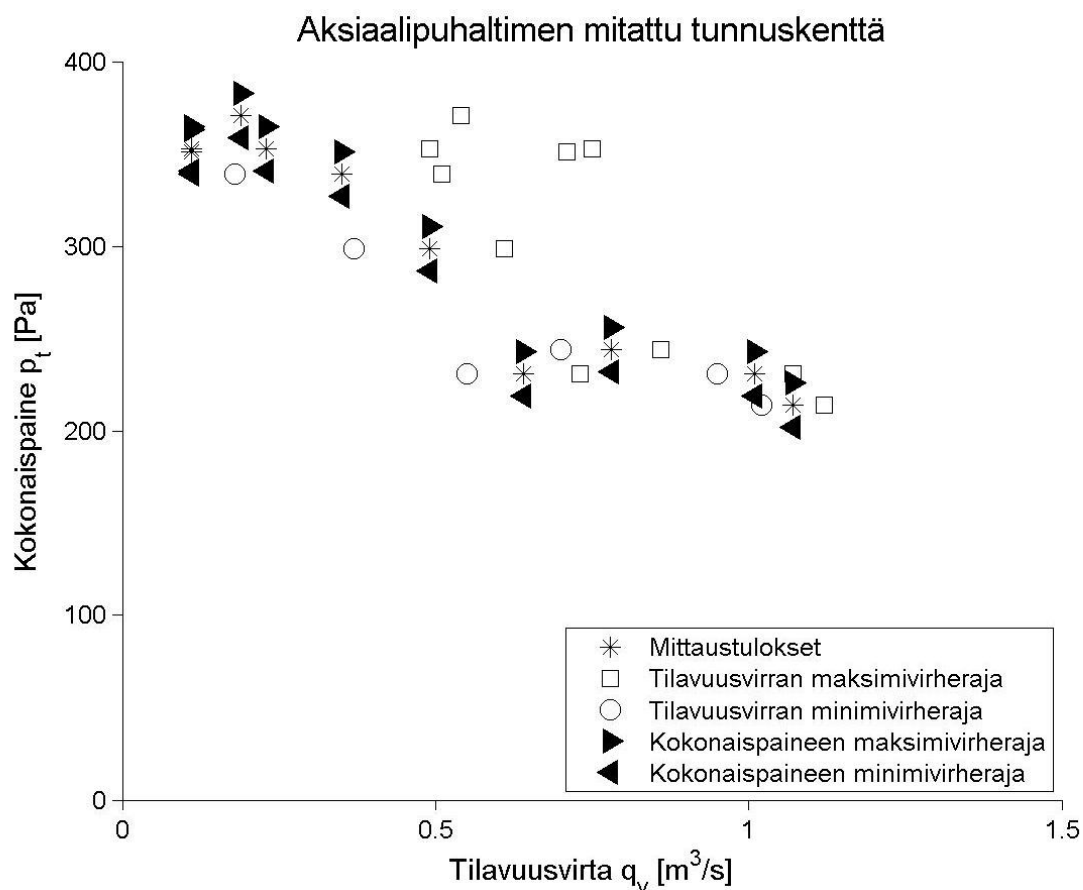
$$\frac{\delta p_t}{p_t} = \frac{1}{p_t} \sqrt{(\delta p_{s4})^2 + (\delta p_{s3})^2 + (\delta \Delta p_{24})^2 + (\delta \Delta p_{31})^2}. \quad (44)$$

Käytetään imupuolen staattisen paineen virheenä δp_{s3} mikromanometrin virhettä 11,4 Pa, painepuolen staattisen paineen virheenä δp_{s4} Beamex -painemittarin kalibrointitulosten keskihajonnasta laskettua virhettä 3,1 Pa ja kitkapainehäviöiden virheinä $\delta \Delta p$ arvoa, joka saadaan kertomalla suhteellinen virhe 8,5 % yhtälöstä (43) kitkapainehäviön suuruudella. Tällöin yhtälöstä (44) saadaan kokonaispaineen kokonaisepävarmuudeksi 3,2...5,6 % riippuen paineesta. Mitä suurempi kokonaispaine on, sitä pienempi on sen epävarmuus.

5.7 Puhaltimen tunnuskenttä

Puhaltimen tunnuskenttä koostuu puhaltimen eri pyörimisnopeuksilla ja siipikulmilla mitatuista puhallinkäyristä. Puhallinkäyrä on paraabelin muotoinen graafinen esitys, jossa yleensä käytetään x-akselilla tilavuusvirtaa ja y-akselilla puhaltimen paineennousua kokonais- tai staattisena paineena.

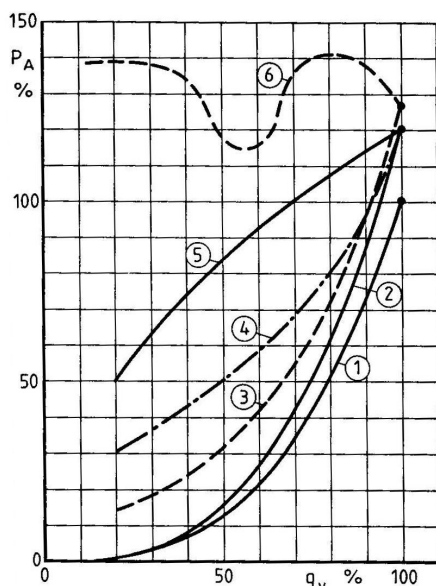
Tässä työssä tunnus kentän (kuva 5.1) x-akselilla esitetään pitot-putkella mitattu tilavuusvirta ja y-akselilla puhaltimen kokonaispaine, jotka on muunnettu vastaamaan standarditiheyttä $1,20 \text{ kg/m}^3$. Työn tunnus kenttä koostuu käyristä, jotka on mitattu pyörimisnopeudella $n = 2880 \text{ rpm}$ ja siipikulmalla $\alpha = 29^\circ$ säätöpellin kymmenellä eri asennolla. Keskimmäiset pisteet vastaavat mittaustuloksia. Niiden ympärille sijoittuvat maksimi- ja minimiarvot mittaasepävarmuusrajoissa niin, että y-akselin suunnassa esitetään paineen maksimi- ja minimiarvot sekä x-akselin suunnassa tilavuusvirran maksimi- ja minimiarvot.



Kuva 5.1: Aksiaalipuhaltimen mitattu tunnus kenttä.

Tunnus kentän mittaustuloksia ei tässä työssä voida yhdistää paraabelin muotoisella käyrällä. Kuten kuvasta 5.1 nähdään, käyrän pisteet eivät asetu paraabelille mittaasepävar-

muuden rajoissakaan. Tämä saattaa johtua siitä, että säädettäessä suurella siipikulmalla toimivaa puhallinta kuristussäädöllä, puhallinkäyrä ei olekaan paraabelin muotoinen vaan kuten kuvassa 5.2 numeron 6 käyrä.



Käyrien kuvaukset:

1. Häviötön hyötyteho pyörimisnopeussäädössä
2. Keskipakoispuhallin, pyörimisnopeussäätö
3. Aksiaalipuhallin, siipikulmasäätö
4. Keskipakoispuhallin, johtosiipisäätö
5. Keskipakoispuhallin, kuristussäätö
6. Aksiaalipuhallin, kuristussäätö

Kuva 5.2: Puhaltimen akselitehon riippuvuus tilavuusvirrasta eri säätötavoilla. (Seppänen 1988, 147)

Kuvassa 5.2 esitetään puhaltimen akselitehon riippuvuus tilavuusvirrasta eri säätötavoilla. Kuvaajan y-akselilla esitetään akseliteho, mutta koska teholle pätee yhtälö

$$P = p_t q_v, \quad (45)$$

käyrän muoto ei muutu, vaikka y-akselilla esitettäisiin kokonaispaine, kuten aksiaalipuhaltimen mitatussa tunnuskentässä. Saadut mittaustulokset asettuisivat selvemmin kuvan 5.2 käyrän 6 mukaisesti, jos mittauspisteitä olisi ollut useampi suurilla tilavuusvirran arvoilla.

Saadut mittaustulokset esitetään myös valmistajan ilmoittamassa tunnuskentässä (liite 7), jossa niitä on helpompi vertailla. Vertailun helpottamiseksi valmistajan ilmoittamat ja mitatut suoritusarvot esitetään myös taulukoissa 5.2 ja 5.3.

Taulukko 5.2: Valmistajan ilmoittamien sekä mitattujen kokonaispainearvojen vertailu.

q_v [m ³ /s]	p_t [Pa]	
	valmistajan arvo	mitattu arvo
0,20	-	371
0,50	-	299
0,80	365	244
1,00	350	231

Taulukko 5.3: Valmistajan ilmoittamien sekä mitattujen tilavuusvirtojen vertailu.

p_t [Pa]	q_v [m ³ /s]	
	valmistajan arvo	mitattu arvo
215	1,20	1,07
245	1,15	0,78
300	1,05	0,49
350	1,00	0,11

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Liitteen 1 tunnuskentästä sekä taulukosta 5.2 nähdään, että tilavuusvirralla $1 \text{ m}^3/\text{s}$ valmistajan mukaan puhaltimen kokonaispaine olisi 350 Pa, mutta mittauksen perusteella paine on vain 230 Pa. Säätöpellin 40 asteen kulmalla mitattu $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ tilavuusvirta ei valmistajan tunnuskentän mukaan ole 29 asteen siipikulman käyrällä. Taulukosta 5.3 nähdään, että tilavuusvirralla $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ mitattu kokonaispaine oli noin 300 Pa ja tällä paineella valmistajan ilmoittaman tunnuskentän mukaan puhaltimen tilavuusvirta olisi yli $1 \text{ m}^3/\text{s}$.

Verrattaessa mittaustuloksia valmistajan ilmoittamaan tunnuskenttään liitteessä 7 nähdään, että neljä ensimmäistä pistettä suurimmilla tilavuusvirroilla muistuttavat muodoltaan käyrää, joka siipikulmalla 29° kuuluisi olla, mutta se on suoritusarvoiltaan paljon ilmoitettua heikompi. Toisaalta mittaustuloksia saatiin myös kokonaispaineen arvoilla, joita valmistaja lupaa, mutta kokonaispaineen noustessa 300 Pa, tilavuusvirta romahtaa arvoon $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Valmistajan ilmoittamaan 350 Pa kokonaispaineeseenkin päästään vain, kun tilavuusvirran arvo on lähes $0 \text{ m}^3/\text{s}$.

Käännettäessä säätöpeltiä yli 60 asteen havaittiin, että kanaviston imupuolen paine nousi alipaineesta ylipaineeksi. Airilan (1983, 37) mukaan kompressorin siivistö sakkaa ja virtauksen suunta kääntyy hetkellisesti päinvastaiseksi, jos painepuolen virtausta kuristetaan liikaa. Sakkausta ei kuitenkaan ollut havaittavissa neljällä ensimmäisellä mittauksella, vaikka mittaustulokset asettuvat tunnuskenttään sakkausrajaa muistuttavaan muotoon.

Sakkaus- eli pumppausraja ilmoittaa kompressorin, samoin kuin puhaltimen, turvallisen käyttörajan (Ibid.). Valmistajan ilmoittamassa tunnuskentässä liitteessä 1 nähdään sakkausraja puhallinkäyrän kohdassa, jossa paine laskee tilavuusvirran laskiessa sen jälkeen, kun se on ensin noussut tilavuusvirran laskiessa siipikulmilla 25 asteesta ylöspäin.

Jos puhallin ei toimi puhallinkäyränsä mukaisesti, Suomen standardisoimisliiton julkaiseman SFS -käsikirjan (Ilmastointitekniikka osa 1, 160) mukaan se johtuu joko virheel-

lisestä liitännästä puhaltimen painepuolella tai epätasaisesta ja pyörivästä virtauksesta puhaltimen imuaukolla. Puhaltimen painepuolella käytetty liitäntä on tässä työssä standardin mukainen, joten virheellinen liitäntä painepuolella ei voi heikentää puhaltimen suoritusarvoja. Pieneen kokonaispaineeseen voisi olla syynä myös vuoto kanavistossa, mutta tässä työssä vuototarkastuksessa vuotoja ei havaittu.

Yleisin puhaltimien suorituskykyä heikentävä tekijä on epätasainen virtaus imuaukolla, joka alentaa sekä painetta että tilavuusvirtaa. Imuaukon epätasaisesta virtauksesta seuraa, että siipipyörä ei toimi niin kuin sen kuuluisi ja puhallinkäyrä muuttuu. Ihanteellisessa tapauksessa virtaus imuaukolla olisi aksiaalinen, tasainen ja pyörimätön. (Ibid.)

Virtauksen epätasaisuus huomattiin tilavuusvirran mittauksessa pitot-putkella pienillä tilavuusvirran arvoilla, jolloin dynaamisen paineen arvot heittelevät voimakkaammin ensimmäisen mittaussleikkauksen lähellä kuin toisen. Myös staattisen paineen mittaustuloksissa puhaltimen imupuolella oli suurta heittoa pienillä tilavuusvirroilla. Virtauksen epätasaisuuteen oli kuitenkin syynä virtauksen liiallinen kuristaminen paineaukolla, koska virtauksen epätasaisuus huomattiin vasta, kun säätöpeltiä oli käännetty 70 astetta.

Kanaviston painehäviöitä laskettaessa Reynoldsin luvut ovat välillä $2,7 \cdot 10^4$ - $2,8 \cdot 10^5$. Kun laminaarinen virtaus muuttuu turbulenttiseksi likimäärin Reynoldsin luvulla 2300, voidaan todeta virtauksen olevan täysin turbulenttista kanavistossa. Täysin laminaariseen virtaukseen ei voida päästä kanavistossa esiintyvillä ilman virtausnopeuksilla, mutta epätasaisista ja turbulenttista virtausta voidaan yrittää muuttaa aksiaaliseksi puhaltimen imupuolen kanavaan sijoitettavalla virtauksen oikaisijalla tai liittämällä kaksi eri suuntiin pyörivää puhallinta sarjaan.

Vaikka mittaustilanteessa havaittiin epätasainen virtaus puhaltimen imuaukolla kuristettaessa virtausta liikaa, se ei kuitenkaan selitä sitä miksi puhaltimen suoritusarvot jäävät niin kauaksi valmistajan ilmoittamista arvoista. Puhaltimen kokonaispainehan nousee valmistajan ilmoittamaan 350 Pa:iin vain tilavuusvirran laskiessa $0 \text{ m}^3/\text{s}$. Ja sakkaustahan ei vielä edes tapahdu tilavuusvirran ollessa $1 \text{ m}^3/\text{s}$, jolloin kokonaispaine jää arvoon

200 Pa, vaikka sen kuuluisi olla 350 Pa. Valmistajan ilmoittamia suoritusarvoja ei saavuteta samalla hetkellä mitenkään.

Huonoja suoritusarvoja voidaan yrittää korjata liittämällä kaksi puhallinta sarjaan, jolloin saadaan aikaan suurempi paine, koska muodostettaessa puhaltimien yhteinen ominaiskäyrä puhaltimien kokonaispaineet lasketaan yhteen saman tilavuusvirran kohdalla. Sarjassa toimivien puhaltimien massavirta on sama, jos puhaltimien välillä ei ole vuotoja, kun taas tilavuusvirrat eroavat toisistaan tiheyden muuttuessa. Tilavuusvirran kasvattamiseksi voidaan joko nostaa puhaltimen pyörimisnopeutta, suurentaa siipikulmaa tai liittää kaksi puhallinta rinnakkain. Nostettaessa pyörimisnopeutta on huolehdittava, että rikkoutumisvaaraa ei synny ja että moottorin teho riittää. Rinnakkaiskäytössä puhaltimien yhteinen ominaiskäyrä saadaan laskemalla samaa kokonaispainetta vastaavat tilavuusvirrat yhteen.

Mittaustulosten eroavuuteen valmistajan ilmoittamasta tunnuskentästä voi vaikuttaa myös mittausjärjestelyjen erilaisuus. Valmistajan ilmoittamasta tunnuskentästä ei käy ilmi onko se tuotettu standardin mukaisesti tai ovatko mittaukset muunnettu vastaamaan standarditiheyttä. Tulee myös huomioida, että eri mittauskanavilla saadut tulokset ovat suoraan vertailukelpoisia vain, jos puhaltimen kanavistoon liittämiseen on käytetty samaa liitännätapaa. Tässä työssä puhallin on liitetty kanavistoon sekä imu- että painepuolelta, mutta valmistajan käyttämiä liitännä- ja mittauksia ei ole tiedossa.

7 YHTEENVETO

Tämän kandidaatintyön tavoitteena oli todeta Miracon ilmoittaman Miravent - aksiaalipuhaltimen MV31 - 135/8 tunnuskentän paikkansapitävyys. Mittaus toteutettiin puhaltimen ollessa liitettynä sekä imu- että painepuolelta kanavistoon pyörimisnopeudella $n = 2880$ rpm ja siipikulmalla $\alpha = 29^\circ$. Puhallinkäyrän tuottamiseen tarvittavia puhaltimen suoritusarvoja olivat tunnuskentän x-akselilla esitettävä tilavuusvirta ja y-akselilla esitettävä puhaltimen kokonaispaine.

Tilavuusvirran selvittämiseksi käytettiin kolmea vaihtoehtoista tapaa, pitot-putkimenetelmää, termoaanemometriä sekä erityistä paine-eroon perustuvaa ilmavirran mittauslaitetta, joilla saatuja tuloksia verrattiin toisiinsa. Kokonaispaineen laskemiseksi mitattiin virtauksen staattinen paine sekä puhaltimen imu- että painepuolella kanavistossa. Lisäksi standardin mukaiseen mittaukseen kuuluivat ilman kosteus- ja lämpötilamittaus kanaviston imuaukon läheisyydessä, ympäristön paineen mittaus sekä lämpötilamittaus kanaviston paineaukolla.

Mittaustuloksista selvisi, että puhallin ei toimi valmistajan ilmoittaman puhallinkäyrän mukaisesti, vaan sekä tilavuusvirta että kokonaispaine ovat ilmoitettua heikompia. Tähän saattaa olla syynä valmistajan erilainen mittausjärjestely puhaltimen tunnuskentän määrittämisessä, epätasainen ja pyörivä virtaus puhaltimen imuaukolla tai virheellinen liitäntä painepuolella. Virtauksen epätasaisuus kanavistossa havaittiin sekä dynaamisen paineen mittauksessa pitot-putkella että staattisen paineen mittauksessa painemittarilla pienillä tilavuusvirran arvoilla kuristettaessa virtausta paineaukolla liikaa. Se ei kuitenkaan selitä paljon ilmoitettua pienempää kokonaispainetta suurilla tilavuusvirran arvoilla, jolloin sakkausta ei tapahtunut. Myöskään painepuolen liitäntä ei voi olla syynä suoritusarvojen heikkouteen, koska liitäntä oli tässä työssä standardin mukainen.

Kokonaispainetta voidaan kasvattaa liittämällä kaksi puhallinta sarjaan. Puolestaan tilavuusvirran kasvattamiseksi voidaan kaksi puhallinta liittää rinnan, suurentaa siipikulmaa tai nostaa puhaltimen pyörimisnopeutta.

LÄHDELUETTELO

- Airila, Mauri et al. 1983. Kompressorikirja. Vantaa: Hydor. 203 s. ISBN 951-99433-8-2
- Backman, Jari. 2006. Energiatekniikan mittaukset: Virtausnopeuden mittaus. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 13 s. Luentomoniste.
- Beamex. 2010. [Beamexin www-sivuilla] Päivitetty 3.6.2010, [viitattu 20.5.2011] Saatavissa: <http://www.beamex.com/fi/about/why-calibrate.html>
- Bureau of Energy Efficiency BEE. 2004. Energy Efficiency Guide Book. [verkkójulkaisu] [viitattu 18.5.2011] 201 s. Saatavissa: http://www.bee-india.nic.in/energy_managers_auditors/documents/guide_books/3Ch5.pdf
- Hänninen, Arto. Paineen- ja paine-eronlähettimet. Julkaisussa: Paine ja virtaus. Helsinki: Suomen säätöteknillinen seura. 1981. s. 49 - 54. Julkaisu No 4. ISBN 951-793-383-5
- Ilmastointitekniikka osa 1. 1992. 2. painos. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 245 s. SFS -käsikirja 103. ISBN 952-9591-22-5
- Ilmastointitekniikka osa 2. 1992. 2. painos. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 197 s. SFS -käsikirja 103. ISBN 952-9591-23-3
- Kalliomäki, Olavi V. Sähköinen lämpötilan mittaus. Julkaisussa: Lämpötilan mittaukset. Helsinki: Suomen säätöteknillinen seura. 1981. s. 37 - 112. Julkaisu No 3. ISBN 951-793-382-7
- Parviainen, Sirkku. 2010. Tilastomatematiikka I. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Matematiikan ja fysiikan laitos. 88 s. Luentomoniste.
- Ryti, Henrik. 1979. Koneoppi, osa 1: Staattiset koneet. Espoo: Otakustantamo. 410 s. Otakustantamo 379. ISBN 951-671-141-3 (nid.), 951-671-257-6 (sid.)
- Råde Lennart, Westergren Bertil. 2004. Mathematics Handbook for Science and Engineering. Edition 5:6. Lund: Studentlitteratur. 562 s. ISBN 978-91-44-03105-5

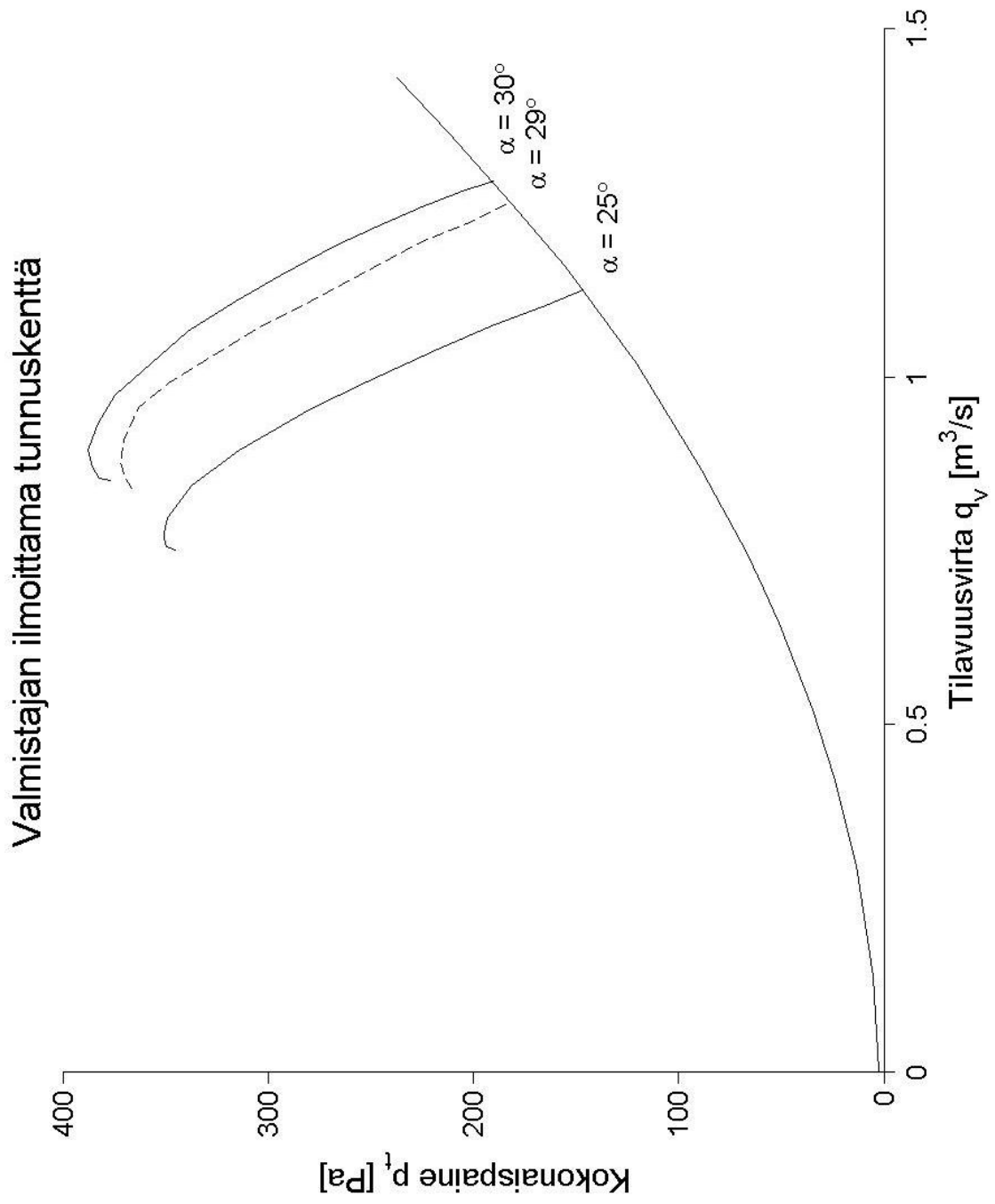
Seppänen, Olli. 1988. Ilmastointiteknikka ja sisäilmasto. Helsinki: LVI-Kustannus. 351 s. ISBN 951-96098-0-6

SFS-EN ISO 5801:en. 2007. Industrial fans. Performance testing using standardized airways. [sähköinen standardi] Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 233 s. [viitattu 25.5.2011] Saatavissa LUT:n työntekijöille: <http://sales.sfs.fi/servlets/SFSContractServlet?action=enterContract&contractId=13002>

Weckström, Thua (toim.). 2005. Lämpötilan mittaus. 2. painos. Helsinki: Mittatekniikan keskus. 135 s. Julkaisu J4/2005. ISBN 952-5209-96-2

White Frank M. 2003. Fluid Mechanics. Edition 5. New York: The McGraw-Hill. 866 s. ISBN 0-07-119911-X

LIITE 1. PUHALTIMEN VALMISTAJAN ILMOITTAMA TUNNUSKENTTÄ



LIITE 2. PAINEMITTARIN KALIBROINTIPÖYTÄKIRJA

1 bar = 100000 Pa

Mittauspöytäkirja: Paineanturin kalibrointi

Kalibrointipäivämäärä: 27.5.2011 klo 14.50

Kalibroitu laite: TSI DP-CALC 8702 mikromanometri 1.

Kalibrointilaik: Bearex MCS 12.4.2011

Tyyppi:

2. Bearex Model PC12

Valmistusnumero:

type 20125

ser nr 13202

Resoluutio: 1 Pa

Kalibroija: Jenna Tiainen

Ilman paine:

DP-CALC

Bearex

kalibrointilaite	1. anturi ylöspäin	1. anturi alaspäin	kalibron- tilaite	2. anturi ylöspäin	2. anturi alaspäin		3. anturi ylöspäin	3. anturi alaspäin
paine [Pa]	paine [Pa]	paine [Pa]	paine [Pa]	paine [Pa]	paine [Pa]		paine	paine
45 35	35		85	84				
102	100		316	314				
215	212		810	809				
315	311		1263	1257				
800	790		1253	1250				
1350	1333		2110	2107				
2000	1973		1240		1237			
1460		1444	580		577			
870		858	215		212			
645		637	2		1			
338		333						
101		101						
34		33						

LIITE 4. PUHALTIMEN MITTAUSPÖYTÄKIRJA

Mittauspöytäkirja: Puhaltimen mittaus

Päivämäärä ja aika: *7.10.11.00 - 28.6.2011*
16.00

Mittauspaikka: Cardo Production Finland Oy Yläniitynkatu 9, 53100 Lappeenranta

Mittauksen suorittaja: Jonna Tiainen

Mittattavan puhaltimen tunnistetiedot: Miraco Miravent - aksiaalipuhallin MV 31 - 135/8

valm. nro. 28287-2 8.2008

Mittalaitteiden tunnistetiedot:

Pitot-putki ja manometri: TSI DP-Calc 8702

Painemittari: Beamex PC12

Termoanemometri: TSI Velocicalc 8345

Ilmavirran mittauslaite: Halton MSD

Paine-eromittari: HK Instruments DPG600

Barometri: Präzisions-barometer Compensiert

Termoelementti: TES 1312A k-tyyppi

Kosteus- ja lämpötilamittari: Vaisala HMI 31, kapasitiivinen anturi Vaisala Humicap
1638 HM ja PT-100 -anturi

Mittausleikkauksen sijainti puhaltimen imuaukosta l_{31} : *158 cm*

Mittausleikkauksen sijainti puhaltimen paineaukosta l_{24} : *132 cm*

(jatkuu)

(liite 4 jatkoa)

pitot-putkella
 epävarmuus
 kasvaa
 ↓

mahdoll.
 vuotoja
 mm pelti
 ↓

säätöpelti		0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°	
pitot		p _a [Pa]										
oikealta	1. halk.	1	95	74	43	30	16	9	3	2	2	0
		2	105	70	47	29	23	11	4	3	2	1
		3	115	102	53	40	24	13	5	3	2	0
		4	115	104	59	41	25	14	6	3	3	1
		5	118	104	62	42	26	14	5	3	3	1
		6	118	105	63	43	25	13	5	4	3	1
		7	118	105	63	43	26	14	5	3	3	1
		8	115	105	62	43	25	14	5	3	3	2
		9	100	103	58	41	21	12	5	3	3	2
		10	96	104	58	40	18	12	4	3	3	1
vasemmalta	2. halk.	1	104	87	56	40	21	9	5	3	0	1
		2	99	103	62	42	20	10	5	3	0	2
		3	117	104	63	42	26	12	5	4	1	2
		4	118	104	64	43	25	12	6	4	1	2
		5	118	105	62	43	26	12	6	4	1	1
		6	118	106	64	43	26	12	6	4	2	2
		7	119	106	64	43	26	12	6	4	2	2
		8	120	106	64	43	27	12	6	4	2	1
		9	118	106	60	40	26	11	5	4	2	1
		10	111	101	57	36	24	7	5	4	2	1

↑
 huomio:
 resoluutio
 vain 1 Pa

LIITE 5. TILAVUUSVIRRRAN LASKENTATULOKSET

halkaisija	D [m]	0,3150									
	säätöpelti [°]	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
barometri	p(a) [mmHg]	762	762	762	762	762	762	762	762	762	762
	p(a) [Pa]	101592	101592	101592	101592	101592	101592	101592	101592	101592	101592
	φ [%]	0,486	0,491	0,489	0,484	0,474	0,468	0,465	0,464	0,461	0,460
	t(0) [°C]	23,8	24,0	24,2	24,3	24,5	24,8	25,0	25,2	25,5	25,7
taulukosta	p'(h) [Pa]	2900	2900	2900	2900	2950	3150	3150	3150	3300	3450
	p(h) [Pa]	1409,4	1423,9	1418,1	1403,6	1398,3	1474,2	1464,75	1461,6	1521,3	1587
	ρ(0) [kg/m ³]	1,19	1,19	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18
	ρ'(0) [kg/m ³]	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20
termoel.	t(4) [°C]	23,6	24,0	24,1	24,0	25,3	25,4	25,9	26,2	27,1	27,5
	t(4) [°C] korj.	23,5	23,9	24,0	23,9	25,2	25,3	25,8	26,1	27,1	27,5
MSD	Δp [Pa]	190	170	110	60	40	10	0	0	0	0
	q(v) [l/s]	996,59	942,68	758,29	560,03	457,27	228,63	0,00	0,00	0,00	0,00
π>1,03	q'(v) [l/s]	996,59	942,68	758,29	560,03	457,27	228,63	0,00	0,00	0,00	0,00
	q(v) [m ³ /s]	1,00	0,94	0,76	0,56	0,46	0,23	0,00	0,00	0,00	0,00
termoan.	w [m/s]	13,10	12,40	9,65	7,60	6,25	4,35	2,85	1,77	1,00	0,63
	q(m) [kg/s]	1,21	1,15	0,89	0,70	0,58	0,40	0,26	0,16	0,09	0,06
	q(v) [m ³ /s]	1,02	0,97	0,75	0,59	0,49	0,34	0,22	0,14	0,08	0,05
π>1,03	q'(v) [m ³ /s]	1,02	0,97	0,75	0,59	0,49	0,34	0,22	0,14	0,08	0,05

(jatkuu)

LIITE 6. KOKONAISPAINEN LASKENTATULOKSET

manom.	p(s4) [Pa]	53	89	157	172	257	315	336	370	377	380
	p(s4) [Pa] korj.	54	90	159	174	260	319	340	375	382	385
	$\rho(4)$ [kg/m ³]	1,19	1,19	1,19	1,19	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18
	$\rho'(4)$ [kg/m ³]	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20
manom.	p(s3) [Pa]	-141	-123	-73	-47	-30	-13	-6	10	35	40
	p(s3) [Pa] korj.	-143	-125	-74	-48	-30	-13	-6	10	35	41
	$\rho(3)$ [kg/m ³]	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18
	$\mu(3)$ [kg/ms]	1,82E-05	1,82E-05	1,82E-05	1,82E-05	1,82E-05	1,82E-05	1,83E-05	1,83E-05	1,83E-05	1,83E-05
	Re(3) [-]	282110	266544	204697	168879	129479	90730	59731	48686	29300	27627
	p(d3)[Pa]	112	100	59	40	24	12	5	3	1	1
	$\lambda(3)$ [-]	0,015	0,015	0,016	0,016	0,017	0,019	0,021	0,021	0,024	0,025
	l(31) [m]	1,5800									
	$\Delta p(31)$ [Pa]	8	7	5	3	2	1	1	0	0	0
	p(t1) [Pa]	-39	-32	-19	-11	-9	-3	-2	13	37	41
	$\mu(4)$ [kg/ms]	1,82E-05	1,82E-05	1,82E-05	1,82E-05	1,83E-05	1,83E-05	1,83E-05	1,83E-05	1,84E-05	1,84E-05
	Re(4) [-]	282265	266544	204754	169018	129195	90582	59584	48553	29172	27492
	p(d4)[Pa]	112	100	59	40	24	12	5	3	1	1
	$\lambda(4)$ [-]	0,015	0,015	0,016	0,016	0,017	0,019	0,021	0,021	0,024	0,025
	l(24) [m]	1,3200									
	$\Delta p(24,)$ [Pa]	7	6	4	3	2	1	0	0	0	0
	p(t2) [Pa]	172	196	222	217	286	332	346	378	383	386
	p(t) [Pa]	211	228	241	228	294	334	347	365	347	345
$\pi > 1,03$	p'(t) [Pa]	214	231	244	231	299	339	353	371	353	351
$\pi < 1,03$	p'(t) [Pa]	214	231	244	231	299	339	353	371	353	351
	π [-]	1,002	1,002	1,002	1,002	1,003	1,003	1,003	1,004	1,003	1,003

LIITE 7. MITTAUSTULOKSET VALMISTAJAN ILMOITAMASSA TUNNUSKENTÄSSÄ

