Lämpö- ja olosuhdemittaukset

Jukka Ahokas

www.agrotekno.fi

Johdanto

Tässä monisteessa käsitellään erilaisia maataloudessa tarvittavia olosuhde- ja lämpömittauksia. Lähtökohtana on ollut eläinten ja työntekijöiden hyvinvointi sekä erilaiset lämpöön ja olosuhteisiin liittyvät ilmiöt. Mittauksia on usein käsitelty laajasti, koska samaa periaatetta voidaan käyttää muissakin tapauksissa. Eläinsuojille on annettu suosituksia lämpötilasta, kosteudesta, kaasupitoisuuksita, melusta ja ilmavirran nopeudesta. Itse mittaamisen lisäksi sen tarkoitus ja taustat käydään myös läpi.

Antureiden osalta monisteessa on selostettu myös miten mitatusta signaalista, joka on usein jännitearvo, lasketaan mittausarvo. Useimmiten tämä tapahtuu automaattisesti mittausinstrumentissa, mutta esimerkiksi harrastelija- ja opetuskäytössä käytettävissä mikrokontrollerikehitysalustoissa (Arduino, Raspberry Pi) näitä tietoja tarvitaan tai vaihtoehtoisesti niille on löydettävissä valmiita ohjelmakirjastoja. Nykyisin netistä voi löytää erilaisia laskureita, joita voi hyödyntää yksittäisissä laskuissa.

Ilman ja kaasujen kanssa toimittaessa laskut tulevat monimutkaisiksi, koska lämpötila ja paine vaikuttavat voimakkaasti niiden olomuotoihin. Lisäksi aina ei voida laskea perusyhtälöiden avulla, vaan yhtälöt voivat olla aproksimaatio todellisesta tilanteesta. Toisaalta olosuhteetkin muuttuvat jatkuvasti, jolloin viimeisillä desimaaleilla ei ole paljoakaan merkitystä.

Sisällys

1 Kaasujen ominaisuuksia **4**
1.1 Ideaalikaasulaki . . . 4
1.2 Moolitilavuus . . . 4
1.3 Kaasun tiheys . . . 5
1.4 Massavirtaus . . . 5
1.5 Kuiva- ja kosteuspitoisuus . . . 6
1.6 Tilavuus- ja painoprosentti . . . 6

2 Ilman ominaisuuksia **7**
2.1 Ilmanpaine . . . 8
2.2 Kuivan ilman tiheys . . . 9
2.3 Ilman kosteus . . . 9
2.4 Kostean ilman tiheys . . . 11
2.5 Ilman entalpia . . . 11
2.6 Ilman lämpösisältö . . . 12
2.7 Mollierin diagrammi ja ilman tilojen laskenta . . . 13
2.8 Ilman kosteuden mittaaminen . . . 14
2.8.1 Mekaaniset hygrometrit . . . 15
2.8.2 Kuiva- ja märkälämpötila kosteusmittaus . . . 15
2.8.3 Kastepistehygrometri (dew point hygrometer) . . . 16
2.8.4 Vastus- ja kapasitanssihygrometrit . . . 16

3 Lämpötilan mittaaminen **18**
3.1 Mekaaniset lämpömittarit . . . 18
3.2 Termopari . . . 19
3.3 Vastusanturit . . . 23
3.4 Termistori . . . 26
3.5 Pyrometri, infrapunalämpömittari ja lämpökamera . . . 28
3.6 Digitaaliset lämpötila-anturit . . . 29
3.7 Lämpötila-anturin muutosnopeus . . . 30
3.8 Lämpötila-anturin asennustapa . . . 31

4 Paineen mittaaminen **32**
4.1 Nestepatsasmanometri . . . 32
4.2 Mekaaniset painemittarit . . . 33
4.3 Kapasitiivinen anturi . . . 33
4.4 Pietsosähköinen anturi . . . 33
4.5 Venymäliuska-anturi . . . 34
4.6 Mikromanometri . . . 34

5 Virtausmittaukset **36**
5.1 Virtauksen perusteet . . . 36
5.2 Tilavuusvirtaus . . . 38
5.3 Virtauksen normiointi . . . 38
5.4 Massavirtaus . . . 39
5.4.1 Nesteiden massavirtaus . . . 39
5.4.2 Kiinteiden aineiden tilavuus- ja massavirtaus . . . 40
5.5 Tilavuusvirtausmittarit . . . 42
5.5.1 Pitot-putki . . . 42

5.5.2 Kuristuslaippa . . . 45
5.5.3 Venturiputki . . . 45
5.5.4 Rotametri . . . 45
5.5.5 Kuumalanka, -kalvo tai -palloanemometri . . . 46
5.5.6 Turbiinimittari . . . 47
5.5.7 Tilavuuslaskija . . . 47
5.5.8 Muita tilavuusmittareita . . . 48

6 Melun mittaaminen 49

7 Kaasupitoisuuksien ja päästöjen mittaukset 55
7.1 Sähkökemialliset anturit . . . 55
7.2 Infrapuna-analyysi . . . 55
7.3 Kaasukromatografi . . . 56

8 Mittausesimerkkejä 58
8.1 Karjasuojien olosuhdemittauksia . . . 58
8.2 Eläinten hyvinvointi . . . 58
8.3 Ilmanvaihto . . . 60
8.3.1 Suora ilmanvaihdon mittaus . . . 60
8.3.2 Epäsuora ilmanvaihdon mittaus . . . 61
8.3.2.1 Eläinten lämmön ja kaasujen tuotto . . . 61
8.3.2.2 Lämpötasapaino . . . 63
8.3.2.3 Kosteustasapaino . . . 66
8.3.2.4 Hiilidioksiditasapaino . . . 68
8.4 Päästöjen mittaus . . . 68
8.4.1 Karjasuojien päästöt . . . 68
8.4.2 Haihtuvien päästöjen mittaaminen (Greenhouse Gas Flux) . . . 68
8.5 Lämpövirta . . . 72
8.6 Lämmitystehon mittaus . . . 73
8.7 Kuivausmittaukset . . . 74
8.7.1 Ilmamäärän mittaaminen . . . 75
8.7.2 Kosteuden poistumisnopeus . . . 75
8.7.3 Kuivurin energiankulutus . . . 80
8.7.4 Kuivauksen hyötysuhde . . . 81

Luku 1

Kaasujen ominaisuuksia

1.1 Ideaalikaasulaki

Karjasuojien olosuhteita ja päästöjä sekä maaperän päästöjä mitattaessa tarvitaan myös tietoja kaasujen ominaisuuksista. Kaasujen mittauksissa törmätään omaan nimistöönsä, joka on tarpeen tietää. PPM (ppm = part per million) on miljoonasosa. Prosentti on sadasosa, jolloin 1 % on 10 000 ppm. Miljoonasosan lisäksi on miljardisosa PPB (part per billion). 1 ppm = 1000 ppb. Kaasujen pitoisuudet ovat usein hyvin vähäisiä, esimerkiksi ilmassa on hiilidioksidia n 400 ppm eli koostumuksesta on 0,04 % hiilidioksidi.

Kaasujen voidaan yleisesti katsoa noudattavan ideaalikaasulakeja, yhtälö 1.1. Ainoastaan korkeissa paineissa ja korkeissa lämpötiloissa ne poikkeavat ideaalikaasuista.

$$pV = nRT \tag{1.1}$$

p	Paine, absoluuttinen
n	Ainemäärä moolia
R	Yleinen kaasuvakio, R=8,3143 $\frac{J}{K \cdot mol}$
T	Lämpötila [K]

Esimerkki. *Renkaan paine on 2 bar ja tilavuus on 320 l, lämpötila on 20 ºC. Mikä on paine -20 ºC lämpötilassa? Lasketaan kuinka monta moolia renkaassa on. Yhtälössä 1.1 paineena on absoluuttinen paine eli rengaspaineeseen pitää lisätä ilmanpaine, jotta saadaan absoluuttinen paine. Ainemäärä saadaan ratkaisemalla se yhtälöstä 1.1,* $n = \frac{p \cdot V}{R \cdot T} = \frac{(101325+200000)Pa \cdot 0{,}32m^3}{8{,}3143 \frac{J}{K \cdot mol} \cdot (20+273{,}15} = 39{,}6$ *mol. Nyt voidaan laskea mikä paine on -20 ºC. Ratkaistaan yhtälöstä 1.1 paine,* $p = \frac{n \cdot R \cdot T}{V} = \frac{39{,}6 \cdot 8{,}3143 \frac{J}{K \cdot mol} \cdot (-20+273{,}15}{0{,}32m^3} = 260200$ *Pa. Tämä on absoluuttinen rengaspaine ja ilmanpaineseen verrattuna tästä pitää vähentää ilmanpaine.* $p_{rengas} = 260200 - 101325 = 158\ 875$ *Pa = 1,6 bar. Oletuksena on, että lämpötilan muutos ei vaikuta renkaan tilavuuteen. Todellisuudessa lämpötilan lasku pienentää hieman kumia ja myös vannetta.*
Tämä voidaan laskea myös helpommin, Yhtälö 1.1kirjoitetaan muotoon $\frac{pV}{T} = n \cdot R = vakio$*, jolloin* $\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$*. Koska tilavuus säilyy samana* $p_2 = p_1 \frac{T_2}{T_1} = (101325 + 200000) \cdot \frac{-20+273{,}15}{20+273{,}15} = 260\ 210$ *Pa, jolloin rengaspaine on 260 210 - 101 325 = 1,6 bar.*

1.2 Moolitilavuus

Moolitilavuudella tarkoitetaan mikä on yhden moolin kaasumäärän tilavuus. Merkitään yhtälön 1.1 moolimäärä n=1 jolloin saadaan yhtälö 1.2.

$$V_m = \frac{R \cdot T}{p} \tag{1.2}$$

V_m	Moolitilavuus [m^3/mol]

Esimerkki. *Mikä on ilman moolitilavuus kun lämpötila on 0 ºC, 15 ºC tai 20 ºC? Ilmanpaine on normaali ilmanpaine 101325 Pa.*
Lämpötilassa 0 ºC saadaan $V_m = \frac{8{,}314 \cdot 273{,}15}{101325} = 22{,}4$ *m^3/kmol. Vastaavasti 15 ºC lämpötilassa se on 23,6 m^3/kmol ja 20 ºC lämpötilassa 24,1 m^3/kmol.*

1.3 Kaasun tiheys

Kaasun tiheys riippuu lämpötilasta ja paineesta. Tiheyden laskentayhtälö voidaan johtaa ideaalikaasun yhtälöstä, jolloin saadaan yhtälö 1.3

$$r = \frac{p \cdot M}{R \cdot T} \tag{1.3}$$

r	Kaasun tiheys
M	Kaasun moolimassa

Kaasujen moolimassoja on taulukossa 1.1.

Taulukko 1.1: Eräiden kaasujen moolimassoja

Kaasu	Moolimassa g/mol	Tiheys normiolosuhteissa kg/m^3
Kuiva ilma	29,0	1,29
Typpioksiduli N_2O	44,0	1,96
Ammoniakki NH_3	17,0	0,76
Metaani	16,0	0,71
Hiilidioksidi	44,0	1,96
Hiilimonoksidi (häkä)	28,0	1,25

Normiolosuhteissa, kun paine on 101325 Pa ja lämpötila on 0 °C, yhtälö 1.3 saadaan yhtälön 1.4 muotoon.

$$r = \frac{101325Pa}{8,314J/(mol \cdot K) \cdot 273,15K} \cdot M = \frac{M}{22,4\frac{m^3}{kmol}} \tag{1.4}$$

Esimerkki. *Mikä on ilman tiheys lämpötilassa -25 °C ja paineessa 105 000 Pa (korkeapaine)?* $r = \frac{105000Pa \cdot 29,0g/mol}{8,314J/(mol \cdot K) \cdot (273,15-25)K}$ = *1,48 kg/m^3.*

Taulukossa 1.1 on myös kaasujen tiheyksiä normiolosuhteissa.

1.4 Massavirtaus

Pitoisuudet ilmoitetaan usein yksikkönä ppm (part per million, miljoonasosa) ja päästöt massavirtauksena (kg/s, t/a). Laskentaan tarvitaan tämän takia kaasujen tiheydet, jotta tilavuusosat voidaan muuttaa massoiksi. Päästön kuljettajana on useimmiten ilmavirtaus. Päästön tilavuusvirtaus saadaan silloin laskettua kertomalla ilmanvaihto kaasun pitoisuudella. Massavirtaus saadaan tämän jälkeen kertomalla tilavuusvirtaus tiheydellä. Päästömäärät voidaan laskea yhtälön 1.5 avulla.

$$q_{mx} = q_v \cdot C_x \cdot r_x \tag{1.5}$$

q_{mx}	Kaasun x massavirtaus
q_v	Seoksen tilavuusvirtaus
C_x	Kaasun x tilavuuspitoisuus
r_x	Kaasuseoksen tiheys

Esimerkki. *Mittaustuloksina saatiin, että navetan ammoniakkipitoisuus oli 5 ppm, lämpötila 15 °C, ilmanpaine oli normaalipaine ja ilmanvaihtomäärä oli 3200 m^3/h. Tunnissa poistuvassa ilmamäärässä on 5 ppm ammoniakkia eli ammoniakin päästövirtaus on* $\frac{5}{1000000} \cdot 32000$ = *0,016 m^3/h. Ammoniakin moolimassa on 17,0 g/mol, jolloin tiheydeksi saadaan* $r = \frac{101300Pa \cdot 17,0g/mol}{8,314J/(mol \cdot K) \cdot (15+273,15)K}$ = *0,72 kg/m^3. Tämän mukaan saadaan ammoniakkipäästön massavirtaukseksi* $q_{mNH_3} = 3200\frac{m^3}{h} \cdot \frac{5}{1000000} \cdot 0,72$= *12 g/h.*

Jos kaasun pitoisuus halutaan ilmoittaa tilavuusosuuden sijasta massaosuutena, se voidaan laskea kaasun tiheyden avulla, yhtälö 1.3.

Esimerkki. *Navettailman ammoniakkipitoisuus on 8 ppm, mikä on sen massapitoisuus, ilmanpaine on normaalipaine ja lämpötila on 10 ˚C ?*

Ammoniakin moolimassa on 17,0 g/mol (kg/kmol), jolloin saadaan kaasun tiheydeksi $r = \frac{101325Pa \cdot 17{,}0g/mol}{8{,}314J/(mol \cdot K) \cdot (10+273{,}15)K} =$ *0,73 kg/m*^{3} *. Yhdessä ilmakuutiometrissä on 8 ppm ammoniakkia eli sen tilavuus on* $\frac{8}{1000000}m^3$ *ja massamäärä* $\frac{8}{1000000} \cdot 0,76\frac{m^3 \cdot kg}{m^3} =$ *0,6* $\mu g/m^3$.

1.5 Kuiva- ja kosteuspitoisuus

Päästömittaukset voidaan tehdä kuivista tai kosteista näytteistä. Kaikki analysaattorit eivät pysty käyttämään kosteita näytteitä, jonka takia näyte on kuivattava ennen kuin se johdetaan analysaattooriin. Kun vesi on poistettu näytteestä, muiden kaasujen pitoisuudet muuttuvat hieman. Tämä voidaan ottaa huomioon korjauskertoimilla. Yhtälöiden 1.6 avulla muutetaan kostea- ja kuivapitoisuuksien väliltä.

$$C_{xkostea} = C_{xkuiva} \cdot \left(1 - \frac{C_{xH_2O}}{100}\right) \tag{1.6}$$

$$C_{xkuiva} = \frac{C_{xkostea}}{1 - \frac{C_{xH_2O}}{100}} \tag{1.7}$$

Esimerkki. *Ammoniakkipitoisuus kosteassa ilmassa on 10 ppm, mikä on osuus kuivassa ilmassa, jos ilman kosteusosuus kaasuissa on 4,5 % ?*
$C_{NH_3kuiva} = \frac{10ppm}{1-\frac{4{,}5\%}{100}} =$ *10,5 ppm.*

1.6 Tilavuus- ja painoprosentti

Mittaukset tehdään usein tilavuusprosentteina, jos ne halutaan muuttaa painoprosenteiksi, tämä voidaan tehdä yhtälön 1.8 avulla.

$$p_m = \frac{M_{kaasu}}{M_{seos}} \cdot p_v \tag{1.8}$$

p_m	Paino-osuus
p_v	Tilavuusosuus
M_{kaasu}	Kaasun moolimassa
M_{seos}	Kaasuseoksen keskimääräinen moolimassa

Esimerkki. *Ilman hiilidioksipitoisuus on 2300 ppm, mikä on sen paino-osuus?*
Pitoisuus 2300 ppm on 0,23 %. Hiilidioksidin moolimassa M_{CO_2}*=44 g/mol ja kuivan ilman keskimääräinen moolimassa on* $M_{ilma} \approx$ *29 g/mol.* $p_m = \frac{44}{29} \cdot 0,23 =$ *0,35 %.*

Luku 2

Ilman ominaisuuksia

Maatalouden eläinsuojissa halutaan eläimille ja myös työntekijöille hyvät olosuhteet. Tämä tarkoittaa sitä, että niissä pitää olla sopiva lämpötila ja kosteus, vedoton paikka eikä ilmassa saa olla liikaa haitallisia kaasuja. Ilman ominaisuudet mitää tietää myös viljan ja korsimateriaalien kuivaamisessa, joissa ilmaa käytetään siirtämään kosteutta materiaalista pois. Tämän takia on hyvä tietää ilman ominaisuuksista.

Eniten ilmassa on typpeä (N) 78,1 tilavuusprosenttia ja seuraavaksi happea (O_2) 21,0 tilavuusprosenttia. Lopun muodostavat eri jalokaasut ja hiilidioksidi (CO_2, 400 ppm). Kaasujen lisäksi ilmassa on vesihöyryä. jonka määrä vaihtelee olosuhteiden mukaan. Ilman tilaa tarkasteltaessa sekä ideaalikaasulaki että kaasuseoksia käsittelevä Daltonin laki pätevät. Ilman olosuhteille on olemassa omia nimityksiä, kuten: kastepiste (dew point), kuiva lämpötila (dry bulb temperature), märkälämpötila (wet bulb temperature), kastepistelämpötila (dew point temperature), suhteellinen kosteus RH (relative humidity) ja kosteussuhde (absoluuttinen kosteus, absolute humidity).

Ilma on kaasujen seos ja kaasulaki pätee myös kuhunkin ilman seoskaasuun erikseen, laskuissa paine on kyseisen kaasun osapaine ja moolimassa kyseisen kaasun moolimassa. Daltonin mukaan kaasuseoksen kokonaispaine on osakaasujen osapaineiden summa. Ilman kokonaispaine on kuivan ilman ja vesihöyryn osapaineiden summa.

Vesihöyryn määrä ilmassa vaihtelee ja sen määrä vaikuttaa mikrobien elintoimintoon, ilman kuivauskykyyn ja lämpösisältöön. Vesi sitoo haihtuessaan runsaasti lämpöä ja siksi sen vaikutus lämpösisältöön on oleellinen. Ilman tilalaskuissa käytetään yksikkönä kuivaa ilmakiloa, koska kuivan ilman määrä ei muutu kosteuden muuttuessa. Kostea ilma on ilman ja vesihöyryn seos. Kostean ilman kokonaispaine on osakaasujen paineiden summa (ilman ja vesihöyryn, Daltonin laki). Ilma voi sisältää vesihöyryä vain tietyn kokonaismäärän (osapaineen), ylimääräinen vesihöyry muuttuu vedeksi. Vesihöyryn maksimitilaa nimitetään kastepisteeksi, koska vesi alkaa tiivistyä (kondensoitua) tässä tilassa. Kastepisteen läheisyys ilmaistaan suhteellisen kosteuden avulla. Ilman tila esitetään usein nomogrammin avulla, näistä yleisin on Mollier-diagrammi. Ilman tila saadaan myös laskemalla. Internetistä on löydettävissä useita tälläisiä laskimia. Ne voi löytää hakusanan "psychrometric calculator" avulla. Eri laskentatavat voivat antaa hieman poikkeavia tuloksia riippuen siitä, minkälaisia yhtälöitä laskennassa on käytetty.

Ilmalla on seuraavat ominaisuudet, jotka pitää tuntea:

- **Suhteellinen kosteus** kuvaa sitä kuinka lähellä ollaan ilman suurinta kosteuden sitomiskykyä. Kun saavutetaan 100% kosteus ilma ei voi ottaa enempää vettä vastaan ja vesihöyry alkaa tiivistyä (kondensoitua) vedeksi. Lämpötila vaikuttaa siihen kuinka paljon ilma voi sisältää vesihöyryä ja mitä korkeampi lämpötila on, sitä enemmän se pystyy sitomaan vesihöyryä.

- **Kosteussuhde** (absoluuttinen kosteus) ilmaisee kuinka paljon vesihöyryä ilmassa on kuivan ilman kilogrammaa kohden. Yksikkönä voi olla vesihöyry kg/kuivailma kg tai vesihöyry g/kuivailma kg. Esimerkiksi kuivuriuunin imemän ulkoilman kosteussuhde pysyy samana ilman kulkiessa uunin läpi, mutta suhteellinen kosteus muuttuu.

- **Ilman tiheys** muuttuu ilmanpaineen, lämpötilan ja kosteuspitoisuuden mukaan. Kosteuden vaikutus on pieni, joten usein laskuissa käytetään kuivan ilman tiheyttä. Normaalissa ilmanpaineessa ja 15 °C lämpötilassa kuivan ilman tiheys on 1,226 kg/m^3. Lämpötiloissa 0 - 20 °C kuivan ilman tiheys on 1,3 - 1,2 kg/m^3. Näissä lämpötiloissa käytetäänkin usein näitä arvoja ja ilman tiheyttä ei lasketa erikseen.

- **Ominaistilavuus** on tiheyden käänteisarvo, 0 - 20 °C lämpötiloissa ilman ominaistilavuus on 0,77 - 0,83 m^3/kg

- **Entalpia** on ilman lämpösisältö siten, että 0 °C lämpötilassa entalpia on 0 kJ/kg. Entalpiaan vaikuttaa ilman lämpötila ja vesihöyrymäärä.

Taulukko 2.1: Ilmanpaine

Säätila	Paine Pa
Normaalipaine	101 300
Korkeapaine	> 102 000
Vahva korkeapaine	103 000 - 105 000
Hyvin voimakas korkeapaine	106 000
Matalapaine	< 101 000
Syvä matalapaine	98 000 - 99 500
Voimakas myrskymatalapaine	96 000 - 97 000
Hirmumyrsky	87 000 - 92 000

- **Tilavuusvirtaus,** materiaalin virtaus (esimerkiksi kuivausilma, veden poistumisnopeus) ilmoitetaan tilavuuden avulla, m^3/h tai m^3/s. Lämpötila muuttaa virtaavan nesteen tai kaasun tiheyttä, jolloin tilavuusvirtaus muuttuu lämpötilan muuttuessa. Esimerkiksi kuivuriuuni lisää ilman lämpötilaa ja tilavuusvirtaus ennen ja jälkeen uunin on eri suuri tiheyden muutoksen takia.

- **Massavirtaus,** materiaalin virtaus ilmoitetaan massan avulla, esimerkiksi kg/s. Jos tilavuusvirtaus tunnettan, massavirtaus saadaan kertomalla tilavuusvirtaus materiaalin tiheydellä. Lämpötila ei vaikuta massavirtaukseen.

- **Adiabaattisessa** prosessissa ilmasta ei poistu lämpöä eikä siihen tule lisää lämpöä. Hyvin eristetty kuivuri toimii lähes adiabaattisesti, lämpöhäviöt ovat hyvin pienet.

- **Mollier** diagrammin avulla voidaan esittää ilman tilan muutokset ja siitä saadaan ilman arvot selville. Mollier diagrammin lisäksi on **Carrier** diagrammi, jossa samat asiat esitetään hieman toisella tavalla. Netissä hakusanoilla 'Mollier diagram', 'Carrier psychrometric chart' tai 'Psychrometric chart' voi ladata näitä diagrammeja.

- **Kuiva lämpötila** on normaalisti mitattu ilman lämpötila

- **Märkä lämpötila** saadaan kun lämpömittari peitetään kostealla harsolla ja siihen kohdistetaan ilman virtaus. Veden haihtuminen viilentää mittarin ja tuloksena saadaan ilman märkälämpötila. Ennen elektronisia antureita tämä oli yleisin ilman kosteuden mittaustapa ja esimerkiksi Mollier diagrammissa on kuiva- ja märkälämpötilat ja niiden risteyskohdasta voidaan lukea ilman kosteus.

- **NTP** (Normal Temperatur and Pressure). Ilman lämpötila ja paine vaikuttavat ilman tiheyteen. Kun ilma lämpenee kuivuriuunissa, se myös harvenee ja ilmamäärä m^3/h kasvaa. Ilman massavirtaus kg/s pysyy samana. Jos puhaltimen ilmamäärät mitataan ennen tai jälkeen uunin, saadaan erilaiset arvot. Puhaltimien testauksissa arvot normioidaan normaalitilaan (NTP). Ilmanpaineena käytetään yleensä ilmakehän normaalipainetta, mutta lämpötila voi olla 0 °C, 15 °C tai 20 °C.

- **Absoluuttinen paine.** Paine mitataan yleensä ilmanpaineeseen nähden. Laskuissa voidaan kuitenkin joutua käyttämään absoluuttista painetta, joka ilmoittaa paineen täyden tyhjiön (0 Pa) suhteen. Normaali ilmanpaine on 1 atm = 101325 Pa (1013 mbar), tämä paine on absoluuttinen paine.

2.1 Ilmanpaine

Ilmanpaine voidaan ilmoittaa eri yksiköissä. Paineen perusyksikkö on Pascal ja normaali ilmanpaine on 101 325 Pa. Usein tämä pyöristetään lukemaan 101 300 Pa. Ilmanpaine voi vaihdella rajoissa 87 000 - 106 000 Pa. Korkeapaineesta puhutaan, kun paine on yli 102 000 Pa ja matalapaineesta kun paine on alle 101 000 Pa. Taulukossa 2.1 on säätilan ja sitä vastaavan ilmanpaineen yhteys.

Säätiedoissa käytetään yleisesti yksikkönä HektoPascalia (hPa). 1 hPa on 100 Pa ja normaali ilmanpaine on 1013 hPa. HektoPascalin kanssa yhtäsuuri on mbar (1hPa = 1 mbar). Myös bar on käytössä ja normaalipaine on 1,013 tai ≈ 1,0 bar. Normaalipainetta merkitään myös atm yksiköllä, 1 atm on normaalipaine. Ilmanpaine atm yksiköissä saadaan seuraavasti $p[atm] = \frac{p[Pa]}{101325}$. Ilmanpainetta mitattiin aiemmin elohopeamittareilla, jolloin käytössä oli elohopeamillimetri, normaalipaine on 760 mmHg. Elohopeamillimetristä käytetään myös nimeä Torr. Nestepatsasmanometrejä on käsitelty kappaleessa 4.1.

2.2 Kuivan ilman tiheys

Kuivan ilman tiheys voidaan laskea yhtälöstä 1.3. Ilma on ilman ja vesihöyryn seos ja kuivan ilman osapaine p_i saadaan vähentämällä ilmanpaineesta vesihöyryn osapaine, p_i=p_{atm}-p_v. $M_i$on ilman moolimassa. Kaasujen moolimassoja M on taulukossa 1.1.

Esimerkki. *Mikä on kuivan ilman tiheys normaalipaineessa, kun lämpötila on 20 C ?*

Yhtälössä käytetään lämpötilan yksikköinä kelviniä eli T=273,15 + 20 = 293,15 K. Kun lasketaan kuivan ilman tiheys, tällöin vesihöyryn osapaine on nolla ja tiheys $r = \frac{pM}{RT} = \frac{101325 \cdot Pa \cdot 28{,}97 \cdot kg \cdot mol \cdot K}{kmol \cdot 8{,}3147 \cdot J \cdot 293{,}15 \cdot K}$ *= 1,20 kg/m*^{3}.

Esimerkki. *Jatketaan aiemmin ollutta rengaslaskua, kuinka paljon renkaan sisällä oleva ilma painaa?*
Renkaassa oleva paine on ylipainetta ilmanpaineeseen nähden. Laskussa pitää käyttää absoluuttista painetta eli lähdetään täydestä tyhjiöstä eli 0 Pa paineesta. Laskuissa käytettävä paine on 101325 Pa + 200000Pa = 301325 Pa. Tiheys $r = \frac{301325 Pa \cdot 28{,}97 kg/kmol}{8{,}3147 \frac{J}{K \cdot mol} \cdot (20+273{,}15)}$ *= 3,6 kg/m*^{3} *ja massa on* $m = 0,32m^3 \cdot 3,6 \frac{kg}{m^3}$ *= 1,1 kg.*

Ilman virtausmittauksissa tarvitaan usein ilman tiheysarvoja. Tätä tarvitaan, jos halutaan tilavuusvirtaus muuttaa massavirtauksessa. Ilmassa on kosteutta, joka myös vaikuttaa tiheyteen, tosin aika usein lasketaan kuivan ilman arvoilla. Jotta mittaustulokset olisivat vertailukelpoisia, ne voidaan joutua redusoimaan normiolosuhteisiin. Niitäkin on kolme käytössä: 0 °C, 15 °C ja 20 °C. Kuivan ilman tiheys voidaan laskea yhtälön 1.3 sijasta, kun käytetään ilman tiheyden lähtökohtana 288 K (15 °C) lämpötilaa, normaalia ilmanpainetta 1013 mbar ja kuivan ilman tiheyttä 1,226 kg/m^3, yhtälön 2.1 avulla.

$$r = r_0 \frac{p_i}{1013} \frac{288}{T_i} \tag{2.1}$$

r	Ilman tiheys
r_0	Ilman tiheys 288 K lämpötilassa $r_0 = 1,226$ kg/m^3
p_i	Ilman paine [mbar]
T_i	Ilman lämpötila [K]

Esimerkki. *Kuivurin kuivausilmaputkessa ilman lämpötila on 70 °C ja siinä on 500 Pa ylipaine. Virtausmittauksessa kuivausilmaputkesta saatiin tulokseksi 15 000 m*^{3}*/h. Mikä on ilman massavirtaus ja mikä on imuilman tilavuusvirtaus, kun sen lämpötila on 5 °C. Ilman paine on 1027 hPa?*

Putkesta mitattu ylipaine on ilmanpaineeseen verrattu eli putkessa absoluuttinen paine on 1027 hPa + 500 Pa. 1 Pa = 0,01 mbar eli 500 Pa ylipaine on 5 mbar. Putkessa on silloin 1027 + 5 = 1032 mbar absoluuttinen paine. Kuivan ilman tiheys on kuivausilmaputkessa tällöin $r = 1,226 \frac{1032}{1013} \frac{288}{343}$ *= 1,049 kg/m*^{3}*ja massavirtaus on* $q_m = 1,049 \cdot 15000 =$ *15731 kg/m*^{3}*. Imuilman lämpötila on 278 K, paine on 1027 mbar, jolloin sen tiheys on 1,288 kg/m*^{3}*.Tilavuusvirtaus on* $q_{vimu} = \frac{15731}{1{,}288}$ *= 12217 m*^{3}*/h.*

2.3 Ilman kosteus

Ilma on kuivan ilman ja vesihöyryn seos. Ilma voi sisältää vain tietyn maksimaalisen määrän vesihöyryä. Tätä tilaa kutsutaan kyllästymistilaksi ja sitä vastaavaa vesihöyryn osapainetta kylläisen vesihöyryn paineeksi. Jos jäähdytämme vaikka huonetilaa ilman, että sen kosteussuhde muuttuu, lämpötilan aleneminen saa aikaan suhteellisen kosteuden kasvun. Kun lämpötila on tullut niin alas, että suhteellinen kosteus on 100%, meillä on kastepistelämpötila. Jos vielä jäähdytämme huonetta, kaikki vesi ei mahdu ilmaan ja ylimääräinen vesi tiivistyy vesipisaroiksi (kondensoituu). Käytännössä tilassa on aina joitakin kylmiä pintoja, esimerkiksi ikkunat, joissa tiivistyminen ensiksi alkaa. Ilman vesihöyrypitoisuus ilmoitetaan yleensä veden massana kuivaa ilmakiloa kohti ja sitä kutsutaan kosteussuhteeksi tai absoluuttiseksi kosteudeksi, yhtälö 2.2.

$$x = \frac{m_v}{m_i} \tag{2.2}$$

x	ilman kosteussuhde
m_v	ilmassa olevan vesihöyryn massa
m_i	kuivan ilman massa

Maataloudessa ja puhekielessä ilman kosteutena käytetään suhteellista kosteutta, joka ilmaisee kuinka lähellä kastepistettä ollaan, kun lämpötila ja ilmanpaine on tietty. Kun suhteellinen kosteus on 100%, ilma ei pysty

sitomaan enempää vettä ja ilman sanotaan olevan kylläinen ja sitä vastaavaa vesihöyryn osapainetta sanotaan kylläisen vesihöyryn paineeksi. Suhteellinen kosteus esitetään prosentteina sen suhteen kuinka suuri vesihöyryn osapaine on verrattuna kylläisen vesihöyryn paineeseen, yhtälö 2.3.

$$RH = \frac{p_v}{p_k} \cdot 100\% \tag{2.3}$$

RH	suhteellinen kosteus
p_v	ilmassa olevan vesihöyryn osapaine
p_k	kylläisen vesihöyryn paine

Se kuinka paljon ilmaan mahtuu vettä riippuu etenkin lämpötilasta. Kylmä ilma pystyy sitomaan vain vähän vettä ja kuuma ilma paljon. Jos ilman lämpötila muuttuu ilman, että ilman vesimäärässä (kosteussuhteessa) tapahtuu muutosta, ilman suhteellinen kosteus muuttuu, koska ilman veden sitomiskyky muuttuu ja suhteellinen kosteus ilmaisee vain sen kuinka lähellä kylläistä tilaa ollaan. Näin käy esimerkiksi kuivurin uunissa. Jos uunin imuilman lämpötila on vaikka 10 ^{o}C ja suhteellinen kosteus 70%, uunin jälkeen lämpötila voi olla vaikka 70 ^{o}C ja suhteellinen kosteus on vain 3 % luokkaa. Ilman vedensitomiskyky parani lämmityksen ansiosta reilusti. Ilman kosteussuhde sen sijaan säilyy samana. Ilmassa on ennen ja jälkeen lämmittämisen n 5 g vettä jokaista kuivaa ilmakiloa kohti.

Sijoittamalla tiheys $r = \frac{m}{V}$, yhtälöön 2.2 saadaan kosteussuhteelle kaava $x = \frac{r_v}{r_i}$. Sijoittamalla tuohon yhtälön 1.3 mukaiset ilman ja vesihöyryn tiheydet saadaan $x = \frac{M_v \cdot p_v}{M_i \cdot p_i}$. Ilman kokonaispaine p on kuivan ilman p_i ja vesihöyryn p_v osapaineiden summan, jolloin saadaan $p = p_i + p_v$ ja $p_i = p - p_v$. Sijoittamalla tämä ja kummankin moolimassat edellä olevaan kosteussuhteen yhtälöön saadaan yhtälö 2.4, joka ilmaisee ilman kosteussuhteen paineiden avulla. Ilman tilaa mitattaessa pystymme mittaamaan suhteellisen helposti ilman suhteellisen kosteuden ja lämpötilan. Näiden avulla meidän on laskettava ilman kosteussuhde ja silloin yhtälöämme tarvitaan.

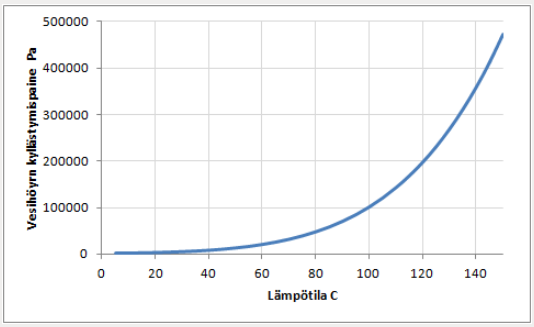
$$x = 0,6220 \frac{p_v}{p - p_v} \tag{2.4}$$

Kylläisen ilman paineet saadaan taulukoista tai yhtälöistä. Yhtälöt eivät ole tarkkoja, vaan ne yrittävät pukea taulukkoarvot yhtälöiden muotoon. Voit tutustua halutessasi asiaan esimerkiksi netistä Wikipedian Vapour pressure artikkelista [Vapour pressure of water] tai Vömelin artikkelista [Vömel H.]. Seppänen ([Seppänen]) antaa laskuja varten yhtälön 2.5. Yhtälö on laadutettu ja antaa kyllästymispaineen Pascaleina, kun lämpötila on Kelvineinä.

$$p_k = \frac{e^{77,345 + 0,0057T - \frac{7235}{T}}}{T^{8,2}} \tag{2.5}$$

Erilaiset yhtälöt merkitsevät myös sitä, että laskentatuloksissa on pieniä eroja. Tämä on normaalia käytettäessä esimerkiksi netistä löytyviä laskimia.

Esimerkki. *Laske vesihöyryn kylläisen vesihöyryn paine lämpötilan funktiona. Lasketaan yhtälö 2.5 lämpötilavälillä 0 C - +150 C. Tulos on alla olevassa kuvassa. Lämpötilan kohoaminen suurentaa kylläisen vesihöyryn painetta nopeasti ja ilma pystyy sitomaan lisää kosteutta.*



Mittalaitteet antavat ilman tilaa mitattaessa yleensä lämpötilan (kuivalämpötilan) ja suhteellisen kosteuden. Uusimmissa mittalaitteissa voidaan saada myös kastepistelämpötila ja kosteussuhde (absoluuttinen kosteus). Kun lämpötila ja suhteellinen kosteus on mitattu, kosteussuhde saadaan seuraavasti:

1. Lasketaan mikä on kylläisen ilman vesihöyryn osapaine (suurin mahdollinen vesihöyryn osapaine), yhtälö 2.5.

2. Lasketaan mikä on ilmassa olevan vesihöyryn todellinen osapaine p_v, tämä saadaan ratkaisemalla p_v yhtälöstä 2.3.

3. Lasketaan kosteussuhde x yhtälöstä 2.4.

Esimerkki. *Navetan suhteellinen kosteus on 87 % ja lämpötila 10 C, mikä on ilman kosteussuhde ?*
Lasketaan ensin kylläisen vesihöyryn osapaine yhtälön 2.5 mukaisesti. $p_{kas} = \frac{e^{77,345+0,0057\cdot 283,15-\frac{7235}{283,15}}}{283,15^{8,2}} = 1224$ *Pa. Vesihöyryn osapaine on siten* $p_v = RH\cdot p_{kas} = 0{,}87\cdot 1224 = 1065$ *Pa. Kosteussuhde on* $x = 0,6220\frac{p_v}{p-p_v} = 0,6220\frac{1065}{101325-1065} = 0{,}0066$ *kg vettä kuivaa ilmakiloa kohti. Jos lasketaan kylläistä tilaa 1224 Pa vastaava kosteussuhde, saadaan 0,0076 kg* H_2O*/kg ilmaa eli ilmaan mahtuisi vielä 1 g vettä jokaista kuivaa ilmakiloa kohden ennenkuin tultaisiin kylläiseen tilaan (kastepisteeseen).*

Käyttötarkoituksesta riippuen voidaan tarvita myös ilman muita suureita, näiden laskennassa voidaan käyttää tämän kappaleen laskukaavoja tai netistä tai appikirjastoista löytyviä ohjelmistoja.

2.4 Kostean ilman tiheys

Kun meillä on samassa tilavuudessa sekä kuivaa ilmaa $m_i$että vesihöyryä m_v, sen tiheys r_{iv} saadaan yhtälön 2.6 mukaisesti.

$$r_{iv} = \frac{m_i + m_v}{V} \tag{2.6}$$

Sijoitetaan tähän ideaalikaasun (1.1) yhtälöt erikseen kuivalle ilmalle ($\frac{m_i}{V} = \frac{p_i M_i}{RT}$) ja vesihöyrylle ($\frac{m_v}{V} = \frac{p_v M_v}{RT}$), jolloin saadaan yhtälö 2.7.

$$r_{iv} = \frac{p_i M_i + p_v M_v}{RT} \tag{2.7}$$

Kun otetaan huomioon kosteussuhteen määritelmä, yhtälö 2.2, kostean ilman tiheydelle saadaan yhtälö 2.8, jossa r_{ik} on kuivan ilman tiheys.

$$r_{iv} = (1 + x) \cdot r_{ik} \tag{2.8}$$

Kun ollaan normaaleissa karjasuojien lämpötiloissa ja myös kuivauksen lämpötiloissa, kostean ilman tiheytenä voidaan käyttää kuivan ilman tiheyttä ilman suurempaa virhettä.

Esimerkki. *Kuivurin poistoilman lämpötila on 35ºC ja suhteellinen kosteus on 80%. Poistoilman ilmamääräksi on mitattu 10 400* m^3*/h. Mikä on kuivurista poistuvan veden massavirta?*
Lasketaan ensin kylläisen ilman vesihöyryn osapaine yhtälöllä 2.5, $p_{kas} = \frac{e^{77,345+0,0057(273,15+35)-\frac{7235}{273,15+35}}}{T^{8,2}} = 5607$ *Pa. Ilmassa olevan vesihöyryn osapaine on (yhtälö 2.3)* $p_v = 0{,}8\cdot 5607$ *Pa = 4486 Pa ja kosteussuhde on (yhtälö 2.4)* $x = \frac{0,622\cdot 4486}{101300-4486} = 0{,}029$ *kg vettä yhtä kuivaa ilmakiloa kohden. Otetaan ilmanpaineeksi 1 atm = 101 325 Pa, jolloin kuivan ilman tiheys (yhtälö 1.3)* $r = \frac{(101325-5607)\cdot 29,0}{8,3147\cdot 308,15} = 1{,}10$ *kg/*m^3*. Kuivan ilman osapaine saatiin vähentämällä kokonaispaineesta vesihöyryn osapaine. Kostean ilman tiheys on (yhtälö 2.8) (1+0,029)·1,10 = 1,13 kg/*m^3*. Poistoilman massavirta on tällöin 1,13·10 400 = 11 728 kg/h(ilma +vesi). Ilman tiheys on ilman ja vesihöyryn tiheyksien summa, jolloin vesihöyryn tiheys on 1,13 - 1,10 = 0,03 kg/*m^3 *ja sen massavirta on 0,03·10 400 = 328 kg/h.*
Jos olisi laskettu kuivan ilman arvojen mukaan, kokonaismassavirta olisi ollut 10 400·1,10 = 11 400 kg/h ja veden massavirta 0,029·11 400 = 328 kg/h. Tällä tarkkuudella laskettuna tarkemmalla ja epätarkemmalla yhtälöllä päästiin samaan tulokseen. Jos lämpötila olisi paljon korkeampi, silloin virhe olisi jo näkyvä.

2.5 Ilman entalpia

Kostean ilman (jossa vesihöyryä m_v kg, kuivaa ilmaa m_i kg) lämpösisältö eli kokonaisentalpia H on yhtälön 2.9 mukainen. Ilman entalpia lasketaan 0 ^{o}C mukaan (T_0).

$$H = c_i m_i (T - T_0) + m_v (l_h + c_h (T - T_0)) \tag{2.9}$$

H	Ilman kokonaisentalpia
c_i	Kuivan ilman ominaislämpökapasiteetti, 1,007 $\frac{kJ}{kg \cdot K}$
m_i	Kuivan ilman massa
T	Ilman lämpötila K
T_0	Vertailulämpötila, 0 ^{o}C = 273,15 K
m_v	Vesihöyryn massa
l_h	Vesihöyryn höyrystymislämpö 0°C lämpötilassa, 2502 $\frac{kJ}{kg}$
c_h	Vesihöyryn ominaislämpökapasiteetti, 1,87 $\frac{kJ}{kg \cdot K}$

Ensimmäinen termi edustaa kuivaa ilmaa (c_i on ilman ominaislämpökapasiteetti vakiopaineessa, c_i =1,007 $\frac{kJ}{kg \cdot K}$) ja jälkimmäinen vesihöyryä. Lausekkeen mukaan entalpia on nolla (näin on siis sovittu entalpian nollakohta), kun T = 0 ^{o}C ja ilma on kuivaa. Lämpötilasta riippuva veden höyrystymislämpö on l_h ja vesihöyryn ominaislämpökapsiteetti on c_h. Veden höyrystymislämpö 0 $°C$ lämpötilassa on 2502 kJ/kg ja vesihöyryn ominaislämpökapasiteetti on 1,87 kJ/(kg K). Kun lauseke 2.9 jaetaan kuivan ilman massalla m_i, saadaan ominaisentalpia, yhtälö 2.10.

$$h = \frac{H}{m_i} = c_i(T - T_0) + x(l_h + c_h(T - T_0)) \tag{2.10}$$

Esimerkki. *Ilman kosteus on 87 % ja lämpötila on 10 C, mikä on sen lämpösisältö ?Edellä laskimme jo, että kosteussuhde on 0,0066 kg/kg. Kuivan ilman lämpösisältö* $h_i = c_i T = 1,006 kJ/kgK \cdot 10\ K = 10,06\ kJ/kg$. *Vesihöyryn lämpösisältö on* $h_v = l_h + c_h T$ *= 2502 kJ/kg + 1,87 kJ/kg K·10K = 2521 kJ/kg. Kostean ilman lämpösisältö* $h = h_i + x h_v = 10,06$ *+ 0,0066·2521 = 26,7 kJ/kg. Ilman kosteudella on huomattava vaikutus ilman lämpösisältöön.*

Yhtälöt 2.9 ja 2.10 on laadittu lämpötilayksikön ollessa Kelvin. Koska entalpian lähtöpiste on 0 ˚C, laskenta voidaan tehdä suoraan käyttämällä T-T_0 sijasta Celsius lämpötilaa.

2.6 Ilman lämpösisältö

Entalpian sijaan ilman lämpösisältö voidaan laskea sen ominaislämpökapasiteetin avulla. Tällöin laskut tapahtuvat kuivan ilman ominaislämpökapasiteetin avulla. Vaikutus on maataloudessa olevissa ilmiöissä muutaman prosentin luokkaa. Laskenta on huomattavasti helpompaa, mutta jos ilman kosteus lisääntyy esimerkiksi kuivauksessa vilja luovuttaa kosteutta ja karjasuojissa eläimet luovuttavat kosteutta, silloin laskut pitää tehdä entalpian kautta. Kuivan ilman ominaislämpökapasiteetti on c_i = 1,006 $\frac{kJ}{kg \cdot K}$ ja sen avulla lasketaan tyypillisesti lämmitysteholaskuja, yhtälö 2.11.

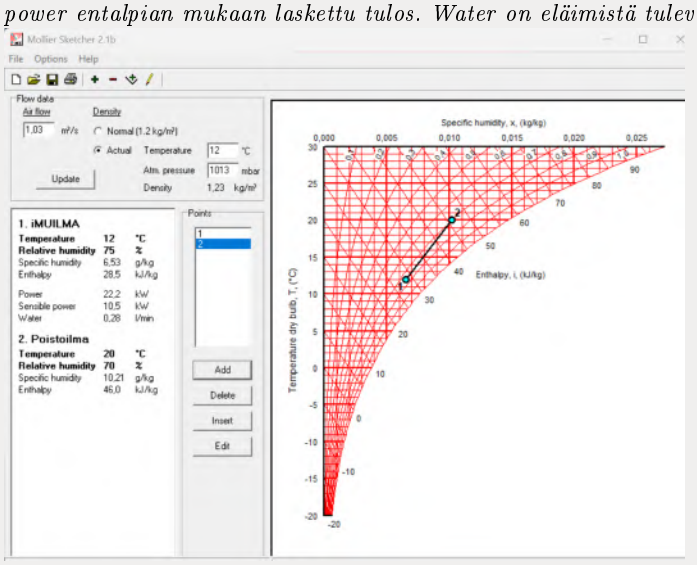
$$P \approx q_v \cdot r \cdot c_i \cdot \Delta T \tag{2.11}$$

Entalpian avulla laskettaessa käytetään yhtälöä 2.12.

$$P = q_v \cdot r \cdot \Delta h \tag{2.12}$$

Esimerkki. *Sikalan ilmanvaihto on 3700 m^3/h, sisääntuleva ilma on 12 ˚C ja sen kosteus on 75%. Poistoilman lämpötila on 20 ˚C ja kosteus on 70%. Ilman paine on 101,325 kPa Sikalan lämmitys ei ole käytössä. Kuinka paljon siat tuottavat lämpöä?*
Lasketaan ensin kuivan ilman tiheys yhtälön 1.3 avulla. Yhtälössä käytetään lämpötilan yksikköinä kelviniä eli T=273,15 + 12 = 285,15 K. Kun lasketaan kuivan ilman tiheys, tällöin vesihöyryn osapaine on nolla ja tiheys $r = \frac{pM}{RT} = \frac{101325 \cdot Pa \cdot 29,0 \cdot kg \cdot mol \cdot K}{kmol \cdot 8,3147 \cdot J \cdot 285,15 \cdot K}$ *= 1,24 kg/m^3. Tässä oletetaan, että ilmanvaihto on mitattu tuloilman puolelta. Lämpötilaero on 20-12 = 8 ˚C tai myös 8 K. Ilmanvaihdon yksikkö pitää muuntaa perusyksiköksi. Tunnissa on 3600 s, jolloin* $\frac{3700}{3600}$ *= 1,03 m^3/s. Siat, valaistus ja koneet tuottavat sisälle* $P \approx 1,03 \cdot 1,24 \cdot 1,006 \cdot 8$ *=10,3 kW.*

Esimerkki. *Lasketaan sama entalpian kautta. Sisääntulevan ilman kyllästyspaine on yhtälön 2.2* $p_k = \frac{e^{77,345+0,0057\cdot 285,15-\frac{7235}{285,15}}}{285,15^{8,2}}$ *= 1398,3 Pa. Vesihöyryn osapaine saadaan yhtälön 2.3 avulla,* $p_v = \frac{75}{100}1398,3$*= 1048,7 Pa. Lasketaan kosteussuhde yhtälön 2.4 avulla* $x = 0,6220\frac{1048,7}{101325-1048,7}$ *= 6,5 g vettä yhtä kuivaa ilmakiloa kohden. Tulevan ilman entalpia on* $h = 1,007 \cdot 12 + \frac{6,5}{1000} \cdot (2502 + 1,87 \cdot 12)$ *=28,5 kJ/kg. Vastaavat arvot poistuvalle ilmalle ovat x=10,2 g/kg ja h=46,0 kJ/kg. Yhtälön 2.12 mukaan laskettu teho on* $P = 1,03 \cdot 1,24 \cdot (46,0 - 28,5)$*= 22,3 kW.*
Sadaan täysin eri tulos kuin edellisen esimerkin tulos. Kummatkin tulokset ovat oikein. Ensimmäinen tulos on kuivan ilman lämmitykseen sioista tuleva teho. Toinen tulos ottaa huomioon myös sioista erittyvän kosteuden (latentti lämpö) ja sen haihduttamiseen tarvittavan tehon. Eläimet tuottavat kahdenlaista lämpöä, suoraa lämpöä ja latenttilämpöä (vesihöyryä). Jos meillä olisi poistoilmassa lämmönvaihdin, joka kondensoisi vesihöyryn, saisimme myös latentin lämmön takaisin. Ilmamäärästä ja kosteussuhteista voidaan laskea, että siat hikoilevat 31 kg vettä tunnissa.
Alla tämä on laskettu myös Mollier Sketcher ohjelmalla. Kuten näkyy, arvot voivat eri laskennoilla voivat olla hieman eriävät. Desimaalit eivät enää ole kovin tarkkoja tuloksissa. Sensiple power on kuivan ilman mukaan laskettu teho ja power entalpian mukaan laskettu tulos. Water on eläimistä tuleva vesimäärä.



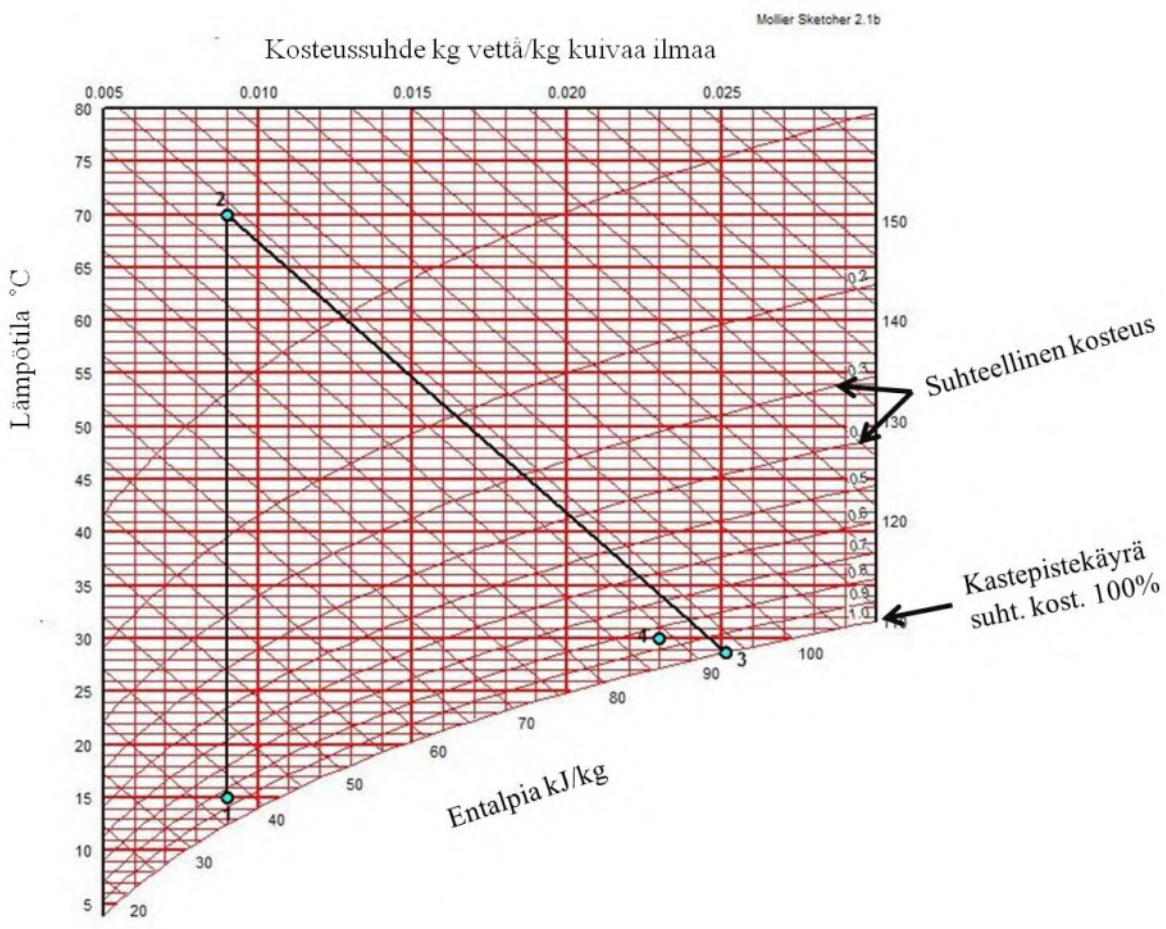
2.7 Mollierin diagrammi ja ilman tilojen laskenta

Aikoinaan, kun tietokoneita ei vielä ollut käytettävissä, tekniset asiat ilmaistiin taulukoiden ja nomogrammien avulla. Niitä käytettäessä saatiin nopeasti laskuissa tarvittavat arvot. Ilman tila ilmaistiin Mollier-diagrammin avulla. Vaikka tietokoneet ovat korvanneet taulukot ja nomogrammit, niistä on silti hyötyä. Richard Mollier oli soveltavan fysiikan professori Saksassa 1900-luvun alkupuolella ja hän kehitti ilman tilan diagrammin. Amerikkalaisessa maailmassa käytetään vastaavasti Carrier-diagrammeja. Siinä on samat asiat kuin Mollier diagrammissakin, mutta kuva on piirretty hieman erilailla. Netistä voit löytää lisätietoja näistä kirjoittamalla hakusanaksi 'psychrometric chart'.

Mollierin diagrammi on näppärä tapa nähdä, mitä esimerkiksi kuivauksessa tapahtuu. Kuvassa 2.1 on piirretty Mollier-diagrammiin neljä pistettä. Piste 1 on kuumailmakuivurin uunin imuilman tila, piste 2 on ilman tila uunin jälkeen ja piste 3 kuivauskennosta poistuttaessa. Tilapisteet menevät tähän tapaan, jos kuivurikoneikossa ei ole ilmavuotoja eikä lämpöhäviöitä. Puhumme adiabaattisesta prosessista eli ilman lämpösisältö (entalpia) säilyy samana koko kuivauksen aikana. Kuvaan 2.1 on piirretty pisteen 3 viereen piste 4. Todellisuudessa kuivurissa on lämpöhäviöita (kuivuri ei ole eristetty) ja tilapiste siirtyy hieman sivuun ja lisäksi poistoilman kosteus saavuttaa vain alkuvaiheessa 100% arvon. Itse asiassa emme kuivausprosessissa hävitä ilman energiaa (entalpiaa) vaan se säilyy samana. Ennen kuivuria lämpötila on korkea ja suhteellinen kosteus alhainen. Kuivurissa veden sitoutuminen ilmaan alentaa lämpötilaa ja kohottaa suhteellista kosteutta. Lopulta puhallamme kylläkin tämän energian kuivurista ulos. Lämmönvaihtimilla voisimme hyödyntää poistoilman energiaa ja käyttää sitä uudelleen.

Mollierin diagrammin tekemiseen ja ilman tilapisteillä laskemiseen löytyy omat tietokoneohjelmansa. Tässä monisteessa on käytetty Mollier Sketcher ohjelmaa, joka on ilmaisohjelma.

Mollierin diagrammissa on vaaka-akselilla kosteussuhde x ja pystyakselilla lämpötila T celsiusasteina (kuva 2.1). Kylläisen höyryn käyrä eli kastepistekäyrä on alimmaisena ja sen kanssa saman suuntaisina ovat suhteellisen kosteuden käyrät. Näiden lisäksi diagrammista löytyy kostean ilman vakioentalpiasuorat.



Kuva 2.1: Esimerkki Mollier diagrammista

Kuvassa 2.1 on ideaalinen esimerkki lämminilmakuivauksen kulusta. Ulkoilman lämpötila on 15 °C, entalpia on 35 kJ/kg ja suhteellinen kosteus on 85% (0,85). Kosteussuhde on tällöin 0,009 kg vettä yhtä kuivaa ilma kg kohden. Ilma lämmitetään uunissa 70 °C lämpötilaan. Ilmaan ei tule lisäkosteutta eli kosteussuhde säilyy samana, mutta lämpötilan nousu mahdollistaa suuremman kosteusmäärän sitomisen ilmaan. Sen takia ilman suhteellinen kosteus pisteessä 2 on n. 5%. Kun ilmaan on tuotu uunin avulla lämpöä, sen entalpia (lämpösisältö) on lisääntynyt ja se on 93 kJ/kg. Kuuma ilma kulkee viljan läpi kastepistekäyrään asti, jolloin lämpötila on laskenut lämpötilaan 29 °C, suhteellinen kosteus on 100% ja kosteussuhde on 0,025 kg vettä yhtä kg kuivaa ilmaa kohden. Ilma sitonut viljasta 0,025 - 0,009 = 0,016 vettä yhtä kg kuivaa ilmaa kohden. Todellisuudessa kuivurissa tapahtuu sekä lämpöhäviöitä että ilmavuotoja. Viljan kosteuden luovutuskyky ei kuivauksen loppuvaiheessa ole hyvä, jolloin voitaisiin tulla esimerkiksi pisteen 4 mukaiseen tilanteeseen.

Hakusanoilla 'psychrometric calculator' voit löytää netistä useita ilman tilaa laskevia ohjelmia. Osa niistä näyttää myös tuloksen Mollier tai Carrier diagrammissa. Kännykkään tai tablettiin löytyy myös vastaavia appeja. Laskuri sivustolla on myös monipuolisia laskimia.

2.8 Ilman kosteuden mittaaminen

Kosteusmittauksia tarvitaan sekä olosuhteiden että kuivausprosessien mittaamiseen. Kosteus vaikuttaa mikrobien elinvoimaan. Kun ilman kosteus on enemmän kuin 75%, homeiden kasvu on mahdollista. Kun kosteus on 80-85 % kasvu on todennäköinen ja 100% kosteudessa riski on erittäin suuri. Homeiden kasvulle sopiva lämpötila on 5 - 40 °C. Myös kestoaika vaikuttaa kasvuun, esimerkiksi yli 80% kosteus 2 - 3 viikon ajan voi käynnistää kasvun. Homeet käyttävät ravinnokseen esimerkiksi puuta, paperia ja tekstiilejä. Jatkuva karjasuojan suuri kosteuspitoisuus voi siten pilata rehua ja rakenteita. Lisäksi homeet ovat terveysriski.

Materiaalin pitkäaikaisessa säilytyksessä sen kosteuspitoisuus o saatava riittävän alas, jotta materiaalin sisällä olevan ilman kosteus on alle 60 %. Esimerkiksi viljan kosteus on saatava alle 14 %, rypsin alle 9 %, heinän ja olkien alle 20 %. Märkiä materiaaleja voidaan säilöä myös esimerkiksi ilmatiiviisti, pakastamalla tai hapottamalla.

Kuva 2.2: Hiushygrometri

Ilman kosteusmittareita kutsutaan hygrometreiksi (hygrometer).

2.8.1 Mekaaniset hygrometrit

Mekaaninen kosteusmittaus (mechanical hygrometer, hair tension hygrometer) eli hiushygrometri perustuu materiaalin pituusmuutokseen sen kostuessa. Tätä on käytetty yleisesti asuinhuoneiden kosteuden mittauksissa, jossa pituuden muutos on yhdistetty mekaaniseen näyttöön.

2.8.2 Kuiva- ja märkälämpötila kosteusmittaus

Kosteus voidaan mitata myös tavallisilla lämpömittareilla. Tätä kutsutaan kuiva- ja märkälämpötilamittaukseksi (psychrometer, wet and dry-bulb hygrometer). Ilman lämpötila mitataan lämpömittarilla (kuiva lämpötila, dry bulb) ja sen jälkeen mittauspäähän asetetaan kasteltu harso. Mittaria heilutetaan, jolloin sen lämpötila laskee kosteuden haihtuessa harsosta. Sopiva virtausnopeus on 3-5 m/s. Merkataan muistiin alin lämpötila (märkä lämpötila, wet bulb).

Näitä mittareita on myös saatavissa siten, että siinä on kaksi lämpömittaria, joista toisessa on kostutettava sukka. Kummatkin lämpötilat voidaan lukea samanaikaisesti.

Kun kuiva- ja märkälämpötilat on mitattu, suhteellinen kosteus voidaan laskea seuraavasti:

1. Märkälämpötilaa T_m vastaava vesihöyryn osapaine saadaan yhtälön 2.5 avulla. Lämpötilana on märkälämpötila Kelvin asteina.

2. Kuivalämpötilaa T_k vastaava vesihöyryn osapaine p_{ko} saadaan yhtälöstä 2.13, jossa p_{atm} on ilmanpaine ja p_{km} on edellisessä kohdassa laskettu märkälämpötilaa vastaava vesihöyryn osapaine.

3. $$p_{ko} = p_{km} - p_{atm}(T_k - T_m) \cdot 0,000666 \tag{2.13}$$

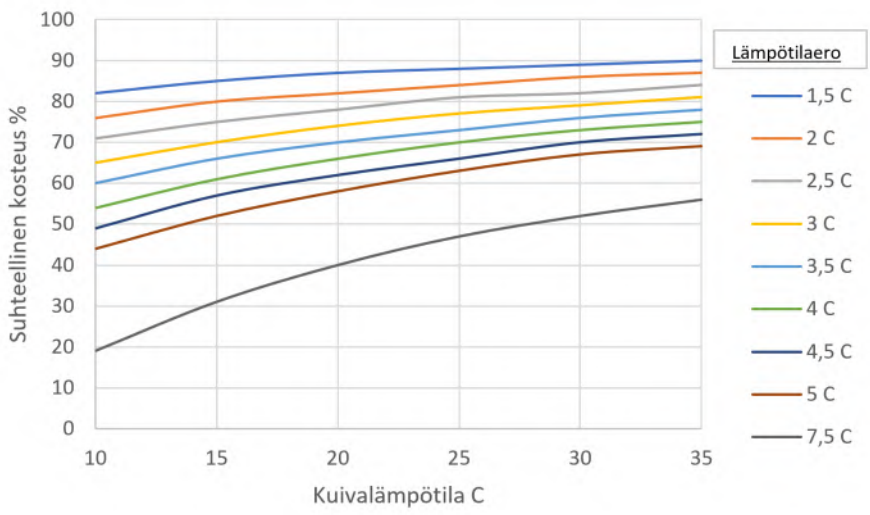
4. Kuivalämpötilaa T_k vastaavan kastepisteen vesihöyryn osapaine saadaan yhtälöstä 2.5.

5. Suhteellinen kosteus saadaan tämän jälkeen yhtälöstä 2.3.

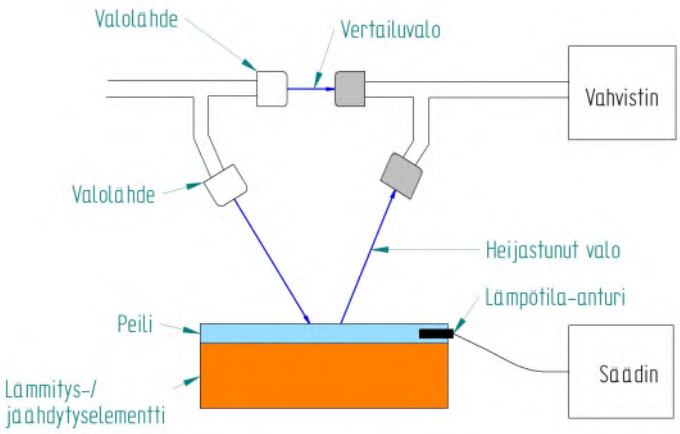
Sama voidaan laskea netistä löytyvillä laskureilla tai se voidaan selvittää taulukoiden avulla. Kuvassa 2.3 on graafi, jonka avulla voidaan myös saada kosteus selville.

Tämä kosteusmittausmenetelmä on sopiva ja yksinkertainen menetelmä myös elektronisten kosteusantureiden toiminnan tarkistamiseen.

Esimerkki. Kuivalämpötilamittarin lukema on 15,5 °C ja märkälämpötilamittarin 12,2 °C. Mikä on ilman suhteellinen kosteus, kun ilmanpaine on 101325 Pa?
Mittausten lämpötilaero on 3,3 °C. Kuvan 2.3 mukaan kosteus on n 68 %.
Lasketaan sama arvo yhtälöillä. Märkälämpötilaa vastaava vesihöyryn osapaine on $p_{km} = \frac{e^{77,345+0,0057\cdot 285,35-\frac{7235}{285,35}}}{285,35^{8,2}}$ = 1417 Pa. Kuivalämpötilaa vastaava osapaine on $p_{ko} = 1417 - 101325 \cdot (288,65 - 285,35) \cdot 0,000666 = 1194$ Pa. Kuivalämpötilaa vastaava kastepisteen osapaine on $p_{kk} = \frac{e^{77,345+0,0057\cdot 288,65-\frac{7235}{288,65}}}{288,65^{8,2}}$ = 1756 Pa. Suhteellinen kosteus on $RH = \frac{1194}{1756} = 68$ %



Kuva 2.3: Suhteellinen kosteus kuivalämpötilan ja kuiva-märkälämpötilan eron perusteella



Kuva 2.4: Peilihygrometri

2.8.3 Kastepistehygrometri (dew point hygrometer)

Kun ilman kastepiste tiedetään, sen perusteella voidaan laskea ilman suhteellinen kosteus. Tämä voidaan mitata jäähdyttämällä peilipintaa ja kun kosteus tiivistyy siihen, on tultu kastepisteeseen. Tätä mittausta kutsutaankin myös nimellä peilihygrometri (chilled mirror hygrometer).

Kuvassa 2.4 on peilihygrometrin periaatekuva. Peiliä jäähdytetään tai lämmitetään ja valon heijastuman ja suoraan tulevan valon eroista saadaan lämpötila, jolloin kosteus alkaa tiivistymään peilin pintaan. Tämä on kaasun kastepistelämpötila. Kastepistehygrometrit ovat yleensä tarkempia kuin muut säköiset kosteusanturit ja ne eivät ole lämpötilaherkkiä. Kastepiste voidaan määrittää tällä laitteella tarkimmillaan ±0,1 - ±0,2 °C tarkkuudella.

2.8.4 Vastus- ja kapasitanssihygrometrit

Vastus- ja kapasitanssiantureiden (impedanssianturi, impedance hygrometer) toiminta perustuu materialeihin, jotka absorboivat kosteutta. Tämä aikaansaa joko vastuksen tai kapasitanssin muutoksen, jonka perusteella kosteus saadaan mitattua, kuva 2.5. Anturit voidaan kytkeä tiedonkeruulaitteistoon, niissä voi olla digitaalinen sarjaväyläliityntä tai kyseessä on mittalaite, jossa on oma näyttö.

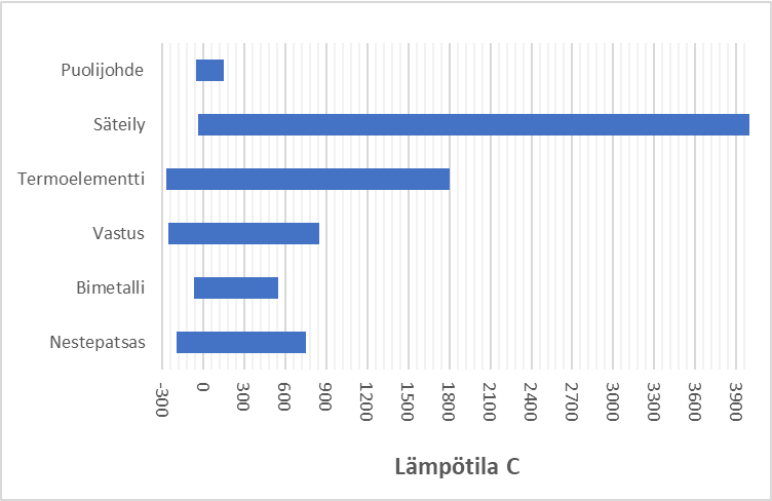
Tunnettuja anturivalmistajia on esimerkiksi Vaisala (Vaisala HUMICAP) ja Honeywell (Honeywell HIH-series). Antureiden epävarmuus on tyypillisesti ±1 - ±5 % RH. Antureihin on yhdistetty usein lämpötilan mittaus, koska kosteusarvo riippuu myös lämpötilasta, jolloin voidaan tehdä lämpötilakompensointi.

Kuva 2.5: Kapasitanssianturin periaate

Karjasuojissa on syövyttäviä kaasuja, jotka voivat syövyttää myös antureita. Samoin likaisuus ja pölyt voivat vaikuttaa niihin. Anturit myös 'vanhenevat' eli niiden ominaisuudet voivat muuttua niiden ikääntyessä. Ilmavirtauksia mitattessa anturit pitää suojata, koska pölyhiukkaset voivat vaurioittaa niitä. Tämän takia antureiden kuntoa ja toimintaa kannattaa tarkkailla säännöllisesti.

Luku 3

Lämpötilan mittaaminen



Kuva 3.1: Tyypillisiä lämpömittareiden mittausalueita

Lämpötila-antureiden perustyypit ovat mekaaniset (nestepatsas, bimetalli), vastus- , termoelementti- ja säteilylämpömittarit. Kuvassa 3.1 on esitetty näiden tyypilliset mittausalueet.

Meillä lämpötila ilmoitetaan Celsius asteina. Anglosaksisessa maailmassa käytetään Fahrenheit asteita. Lämpötilan muunnos Celsius asteista Fahrenheit asteiksi saadaan yhtälön 3.1 avulla ja Fahrenheit asteista Celsius asteiksi yhtälön 3.2 avulla. Teknisessä laskennassa käytetään myös Kelvin lämpötiloja. Sen lähtökohta on absoluuttinnen nollapiste, jonka arvo on -273,15 °C. Muuten jako on sama kuin Celsius-asteikossa. Celsius asteet muutetaan Kelvin asteiksi lisäämällä siihen 273,15, yhtälö 3.3. Vastaavasti Celsius asteet saadaan vähentämällä tämä luku Kelvin asteista.

$$T_F = 9/5 \cdot T_C + 32 \tag{3.1}$$

$$T_C = 5/9 \cdot (T_F - 32) \tag{3.2}$$

$$T_K = T_C + 273,15 \tag{3.3}$$

T_F	Fahrenheit lämpötila
T_C	Celsius lämpötila
T_K	Kelvin lämpötila

Lämpötilan mittaamisesta ja etenkin siihen liittyvästä kalibroinnista ja epävarmuuksista saa hyvän tiedon MIKESin (VTT MIKES) oppaasta *Lämpötilan mittaus* [Wecktsröm 2005].

3.1 Mekaaniset lämpömittarit

Mekaanisten lämpömittareiden toiminta perustuu aineiden lämpölaajenemiseen. Aineena voi olla esimerkiksi elohopea, sprii tai metalli. Mittarista ei saada sähköistä viestiä eli ne ovat luettavia mittareita. Tyypillisesti ne

Kuva 3.2: Savukaasu ja elohopealämpömittari, Suomen lämpömittari

ovat kodeissa sisä- ja ulkolämpötilamittareina, paistomittareina, saunamittareina ja laitteissa, kuten lämmityskattiloissa, lämpötila- ja savukaasumittareina.

Elohopea sulaa -39 ºC lämpötilassa, jolloin tämä on sen alin mittauslämpötila. Jos halutaan mitata alempia lämpötiloja, käytetään alkoholipitoisia mittareita. Mittarin yläraja riippuu käytetystä lasiaineesta, kvartsilasia käytettäessä lämpötila voi olla jopa 750 ºC. Lämpömittarin tulokseen ja tarkistukseen vaikuttaa se miten se on asennettu. Mittari voi olla kokonaan, nestepatsaan verran tai vain alapää on upotettuna. Jos mittari on vain osittain upotettuna, silloin tulokseen vaikuttaa upotuskohdan lämpötila ja myös upotuskohdan ulkopuolinen lämpötila. Hyvin tarkoissa olosuhteissa epävarmuus on ±0,01 °C, käytännössä epävarmuus on ±0,2 °C - ±2 °C.

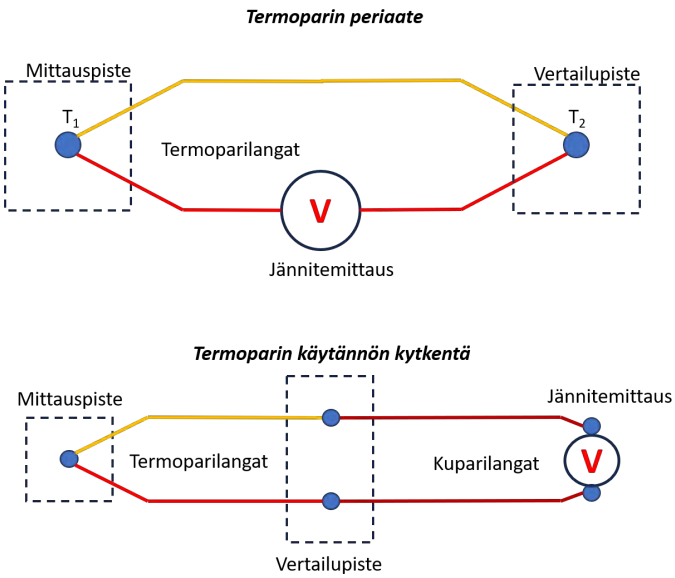
Bimetallimittareissa on kahta eri metallia, joiden lämpölääjenemiskertoimet ovat erisuuret. Saunamittareissa nämä metallit on valssattu yhteen kierukan muotoon. Sauvamittareissa on kaksi metalliputkea, joista ulomman lämpölaajeneminen on suurempaa kuin sisemmän.

Mekaanisiin mittareihin kuuluu myös kapillaarimittarit. Niitä käytetään yleisesti termostaateissa silloin, kun lämpötilaviesti on siirrettävä hieman kauemmas. Kuvassa 3.3 on esimerkki kapillaaritermostaatista. Taipuvassa putkessa ja anturipäässä on nestettä, jonka lämpölaajeneminen aikaansaa lämpötilamittauksen.

Kuva 3.3: Trafaq kapillaaritermostaatti

3.2 Termopari

Termopari (termoelementti, thermocouple) toiminta perustuu kahteen kosketuksessa olevaan eri metalliseen aineeseen. Niiden välille syntyy jännite ja lähettävän metallin varaus tulee positiiviseksi ja vastaanottavan negatiiviseksi. Lämpötila vaikuttaa tasapainotilaan ja mittaamalla jännite saadaan selville lämpötila.



Kuva 3.4: Termoparin kytkentä

Taulukko 3.1: Yleisimpiä termoparityyppejä [IEC 60584-1]

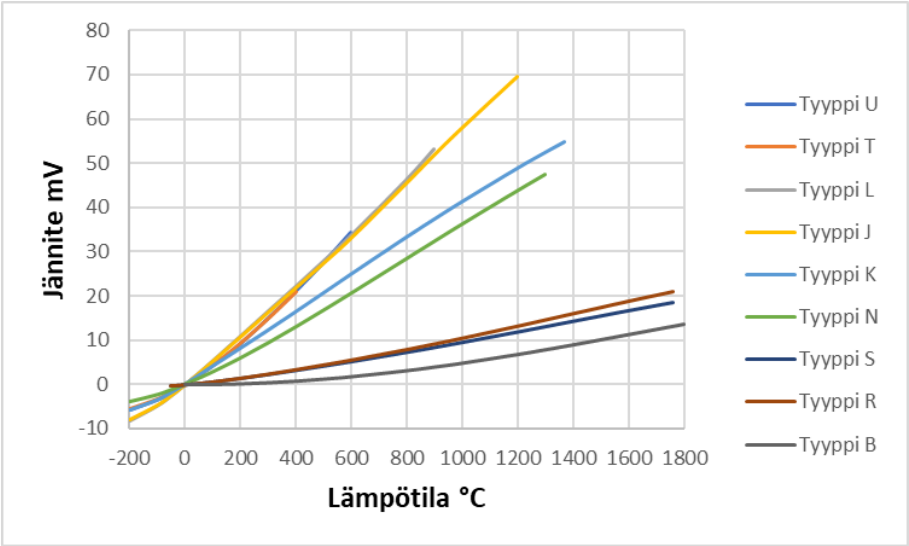
Symboli	Nimitys	Lämpötila-alue ºC	Epävarmuus ºC Suurempi arvoista pätevä
T	Cu-Konst, kupari konstantaani	-200 ... + 350	Luokka 1: ±0,5ºC tai 0,0040·T Luokka 2: ±1,0ºC tai 0,0075·T Luokka 3: ±1,0ºC tai 0,015·T
J	Fe-Konst, rauta konstantaani	-40 ... +750	Luokka 1: ±1,5ºC tai 0,0040·T Luokka 2: ±2,5ºC tai 0,0075·T
K	Ni-CrNi, nikkeli-kromi-nikkeli	-40 ... +1200	Luokka 1: ±1,5ºC tai 0,0040·T Luokka 2: ±2,5ºC tai 0,0075·T
R	Platina 13%, rhodium-platina	0 ... 1600	Luokka 1: ±1,0ºC tai (1+0,003(T-1100)) Luokka 2: ±1,5ºC tai 0,0025·T
S	Platina 10%, rhodium-platina	0... 1660	Luokka 1: ±1,0ºC tai (1+0,003(T-1100)) Luokka 2: ±1,5ºC tai 0,0025·T

Termoparit ovat yksinkertaisia, luotettavia ja hinnaltaan halpoja. Ne soveltuvat hyvin myös korkeiden lämpötilojen mittaukseen. Termoparilankaa voidaan ostaa keloina ja niistä katkaistaan sopivan mittaiset johtimet. Lanka toimii johtimena ja erillisiä johtimia ei tarvita eikä voidakaan käyttää.

Termoparin toimintaperiaate selviää kuvasta 3.4. Kaksi eri metallista olevaa johtoa on yhdistetty mittauspisteessä ja vertailupisteessä toisiinsa. Jos näiden pisteiden lämpötilat ovat erisuuret, niiden välille muodostuu jännite. Alunperin vertailupisteenä (reference junction) käytettiin jääsohjoa (0 ºC) ja jännite-lämpötilariippuvuus on määritetty tämän suhteen. Vertailupisteestä käytetään myös nimeä kylmän pään kompensointi (cold junction). Netistä voit löytää toimintaperiaatteita esittäviä videoita. Esimerkiksi hakusanalla 'thermocouple working principle' löydät niitä.

Käytännön kytkennässä termoparin kiinnityspiste mittariin muodostaa vertailupisteen. Sen lämpötila mitataan erikseen esimerkiksi puolijohdeanturilla. Mittauspisteen lämpötila saadaan joko lisäämällä vertailupisteen lämpötilaan mittauspisteen jänniteviestiä vastaava lämpötila tai, jos halutaan käyttää tarkempaa laskentatapaa, vertailupisteen lämpötila muutetaan vastaavaksi jännitearvoksi. Mitattu jännite ja vertailupisteestä laskettu jännitearvo summataan ja tämä muutetaan lämpötilaksi. Jännite-lämpötilasuhde ei ole täysin lineaarinen ja sen takia jälkimmäinen laskentatapa on tarkempi.

Yleisimpien termoparien jänniteviestit on esitetty kuvassa 3.5. Termoparityyppejä on taulukossa 3.1. Lämpömittareissa ja tiedonkeruulaitteissa on yleensä eri termoelementtityyppien laskenta sisäänrakennettuna. Termoparien jännitteet on myös taulukoitu, näitä voit löytää netistä hakusanoilla 'thermocouple tables'. Laskennassa käytetään polynomilausekkeita, joiden kertoimet on annettu [Texas Instruments]. Löydät myös valmiita termoparilaskureita netistä hakusanoilla 'Thermocouple calculator'.



Kuva 3.5: Termoparien jänniteviestit

Taulukko 3.2: Termoparien Seebeck herkkyyksiä

Termopari	Seebeck µV/°C
K NiCr–NiAl (Chromel–Alumel)	41
J Rauta–Constantan	55
T Kupari–Constantan	43
E Chromel–Constantan	61

Esimerkki. *Käytettävissä on K-tyypin termopari ja yleismittari, joka pystyy mittaamaan myös mV-tason jännitteitä. Seinälämpömittarin mukaan lämpötila on 22 ºC ja yleismittarin lukema on 21 mV. Mikä on mittauslämpötila?*
Kirjoitetaan selaimeen hakusanoiksi 'type K thermocouple table'. Luetaan taulukosta 21 mV vastaava lämpötila, joka on 508 ºC. Lisätään tähän vertailupisteen lämpötila 22 ºC, jolloin saadaan tulokseksi 530 ºC.

Termoparien lämpötilat voidaan laskea karkeasti niiden herkkyyden avulla eli kuinka paljon jännite muuttuu yhtä astetta kohden. Tätä kutsutaan Seebeck kertoimeksi. Laskenta voidaan tehdä yhtälön 3.4 avulla.

$$T = T_{ref} + \frac{U}{S} \tag{3.4}$$

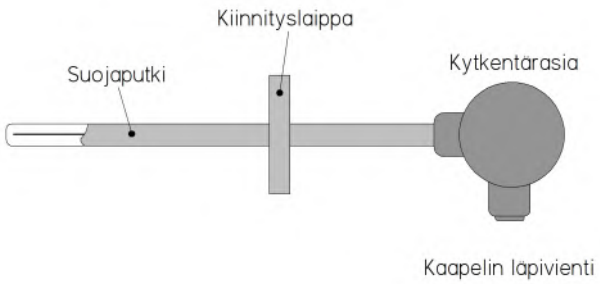
T	Lämpötila
T_{ref}	Vertailulämpötila
U	Mitattu jännite
S	Termoparin herkkyys, Seebeck arvo, taulukko 3.2

Esimerkki. *Käytettävissä on K-tyypin termopari ja yleismittari, joka pystyy mittaamaan myös mV-tason jännitteitä. Seinälämpömittarin mukaan lämpötila on 22 ºC ja yleismittarin lukema on 21 mV. Mikä on mittauslämpötila?*
$T = 22°C + \frac{21mV}{\frac{41\frac{\mu V}{°C}}{1000}} = 534$ *°C. Arvo on 4 °C korkeampi kuin taulukkoarvo. Kuvasta 3.5 nähdään, että jännite-lämpötilavaste on melko lineaarinen. Tämän ansiosta yksinkertainenkin laskutapa antaa kohtuullisen tarkan tuloksen.*

Termoparit on standardisoitu, mutta valitettavasti niillä on sekä kansallisia että kansainvälisiä standardeja. Niiden mukaan mm johtojen väritykset vaihtelevat, kuva 3.6. Termoparin toinen johto on positiivinen (+) ja toinen negatiivinen (-) ja ne on kytkettävä oikein mittalaitteeseen. Mittalaitteesta on tietysti valittava oikea termoparityyppi tai on käytettävä mittalaitteen mukaista termoparia.

Uusi standardi:	IEC 60584-3	DIN EN 60584	ISA MC 96.1
TE-tyyppi	IEC 584	DIN 43714	ANSI MC 96.1
NiCr-Ni / K KCA: Fe-CuNi	+ vihreä/ - valkoinen Vaippa: vihreä	+ punainen/ - vihreä Vaippa: vihreä	+ keltainen/ - punainen Vaippa: keltainen
Fe-CuNi / L	—	+ punainen/ - sininen Vaippa: sininen	—
Fe-CuNi / J	+ musta/ - valkoinen Vaippa: musta	—	+ valkoinen/ - punainen Vaippa: musta
Pt10Rh-Pt / S SCA: E-Cu/A-Cu	+ oranssi/ - valkoinen Vaippa: oranssi	+ punainen/ - valkoinen Vaippa: valkoinen	+ musta/ - punainen Vaippa: vihreä
Pt13Rh-Pt / R RCA: E-Cu/A-Cu	+ oranssi/ - valkoinen Vaippa: oranssi	+ punainen/ - valkoinen Vaippa: valkoinen	+ musta/ - punainen Vaippa: vihreä
Pt30Rh-Pt6Rh / B BC: S-Cu/E-Cu	+ harmaa/ - valkoinen Vaippa: harmaa	—	+ harmaa/ - punainen Vaippa: harmaa
NiCrosil-Nisil / N NC: Cu-CuNi	+ v.punainen/ - valkoinen Vaippa: v.punainen	—	—
Cu-CuNi / U	—	+ punainen/ - ruskea Vaippa: ruskea	—
Cu-CuNi / T	+ ruskea/ - valkoinen Vaippa: ruskea	—	—
NiCr-CuNi / E	+ violetti/ - valkoinen Vaippa: violetti	+ punainen/ - violetti Vaippa: violetti	+ violetti/ - punainen Vaippa: violetti

Kuva 3.6: Yleisimpien standardien mukaisia termoparilankoja, https://www.epicsensors.fi/faq/miten-te-anturi-toimii/



Kuva 3.7: Esimerkki lämpötila-anturin suojataskusta

Termopareilla on myös eri tarkkuusluokkia ja eri paksuuksia. Ohut lanka soveltuu mittauksiin, joissa tarvitaan nopeaa reagointia. Paksu taasen antaa paremman kestävyyden. Termoparien ominaisuudet voivat vaihdella eri erien ja valmistajien välillä. Tarkoissa mittauksissa kannattaa käyttää saman erän termopareja. Termoparin epävarmuudet ovat ±0,5 ... ±2,5°C riippuen termoparityypistä ja tarkkuusluokasta, taulukko 3.1. Tyypillisesti termopari soveltuu hyvin korkeiden lämpötilojen mittaamiseen.

Esimerkki. *Kuivuriuunin puhallusilman lämpötila voi olla korkeimmillaan lähes 100 ºC. Mikä on mittauksen epävarmuus, jos mittaukseen käytetään J-tyypin termoparia?*
J-tyypin epävarmuus on taulukon 3.1 mukaan, luokka 1: ±1,5º C tai 0,0040·T ja luokka 2: ±2,5º C tai 0,0075·T. Tämän mukaan luokan 1 epävarmuus on ±1,5º C tai 0,0040·100 => ±1,5º C tai ± 0,4º C. Näistä valitaan suurempi eli ±1,5º C. Luokan 2 epävarmuus on vastaavasti ±2,5º C tai 0,0075·100 => ±2,5º C tai ± 0,75º C => ±2,5º C.

Termoparin johtojen pintamateriaaleja on erilaisia ja ne valitaan olosuhteiden mukaan, kuten lämpötilan, kulumiskestävyyden tai kemiallisen kestävyyden mukaan. Mittapää voidaan valmistaa kiertämällä johtimet toistensa ympäri, tinaamalla johtimet tai juottamalla johtimet. Pelkän johtimien kiertämisen ongelmana on johtimien hapettuminen, jolloin mittaustulos muuttuu. Tinaaminen ei sovellu korkeisiin lämpötiloihin, koska se sulaa. Termopareja ja lämpötila-antureita varten on myös saatavissa standardoituja asennuslaippoja ja yhteitä.

Termoparilankaa myydään keloina. Sen lisäksi tarjolla on erilaisia valmiita termopariantureita ja standardoituja suojataskuja, kuva 3.7. Suojataskuja on erilaisia ja niissä on erilaisia kiinnistysmahdollisuuksia. Kuvassa 3.7 on esimerkki laipallisesta taskusta. Suojataskuja käytetään etenkin teollisuudessa, koska sen avulla on tarvittaessa helppo vaihtaa anturi suojaputken sisälle.

Lisätietoa termopareista löytyy esimerkiksi Texas Instrumentsin ohjeesta A Basic Guide to Thermocouple Measurements [Wu J. 2023]

3.3 Vastusanturit

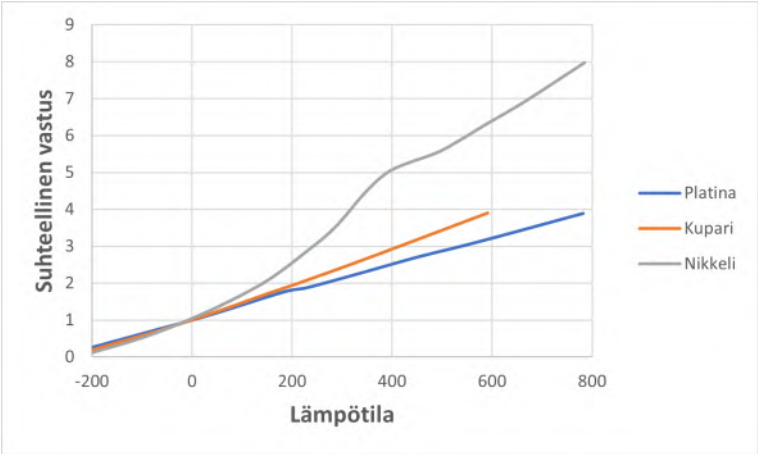
Metallien vastus muuttuu lämpötilan muuttuessa. Tätä ilmiötä voidaan käyttää lämpötilan mittaamiseen. Metallin vastus voidaan laskea 20 °C lämpötilassa yhtälön 3.5 mukaisesti.

$$R = \frac{\rho l}{A} \tag{3.5}$$

R	vastus Ω
ρ	metallin resistiivisyys Ω· m (20 °C)
	kupari $0{,}01678 \cdot 10^{-6}$
	alumiini $0{,}0265 \cdot 10^{-6}$
l	johtimen pituus
A	johtimen poikkipinta-ala

Muissa lämpötiloissa vastus voidaan laskea yhtälön avulla.

$$R(T) = R_{20} \cdot (1 + \alpha(T - 20) \tag{3.6}$$



Kuva 3.8: Metallien vastusten riippuvuus lämpötilasta

R(T)	Vastus lämpötilassa T
R_{20}	Vastus lämpötilassa 20 °C
α	Metallin lämpötilakerroin kupari ja alumiini 0,00393 °C $^{-1}$
T	Mittauslämpötila

Esimerkki. *Kuparijohtimen paksuus on 1 mm ja sen pituus on 2 m. Kuinka paljon sen vastus muuttuu, kun lämpötila muuttuu lämpötilasta -20 °C lämpötilaan +20 °C?*
Johtimen poikkipinta-ala on $A = \frac{\pi \cdot 0{,}001^2}{4} = 7{,}85 \cdot 10^{-7} m^2$ *ja 20* °C lämpötilassa vastus on: $R = \frac{0{,}01678 \cdot 2}{7{,}85 \cdot 10^{-7}} = 0{,}043\ \Omega$. *Lämpötilassa -20* °C saadaan vastukseksi $R(-20) = 0,042 \cdot (1 + 0,00393 \cdot (-20-20)) = 0{,}036\ \Omega$. Vastus muuttuu 0,0067 *Ω, jolloin tarvittaisiin tarkka vastusmittaus. Lisäksi johtojen pitäisi olla koko matkalta mittauslämpötilassa.*

Kuvassa 3.8 on esitetty metallien vastusten suhteellisia riippuvuuksia lämpötilasta.

Yleisimmin käytetään platina-antureita ja niissä on kaksi päätyyppiä Pt100 ja Pt1000. Numerot tarkoittavat nolla-asteessa anturin vastusta. Anturin vastus kasvaa lämpötilan kasvaessa, tästä käytetään lyhennystä PTC (Positive Temperature Coefficient). Anturityypit on standardoitu IEC 60751 [IEC 60751] standardissa. Vastusantureista käytetään myös lyhennettä RTD (Resistance Temperature Detector). Platinan lisäksi antureina käytetään nikkeliä ja kuparia, mutta ne ovat harvinaisempia. Anturien toimintaperiaattetta voit katsoa YouTube kanavalla hakusanoilla RTD working principle.

Platina-anturit eivät ole täysin lineaarisia ja sen takia niiden vastuksille on omat laskentakaavat, alueelle -200 ... 0 ºC käytetään yhtälöä 3.7 ja alueelle 0 ... + 600 ºC yhtälöä 3.8.

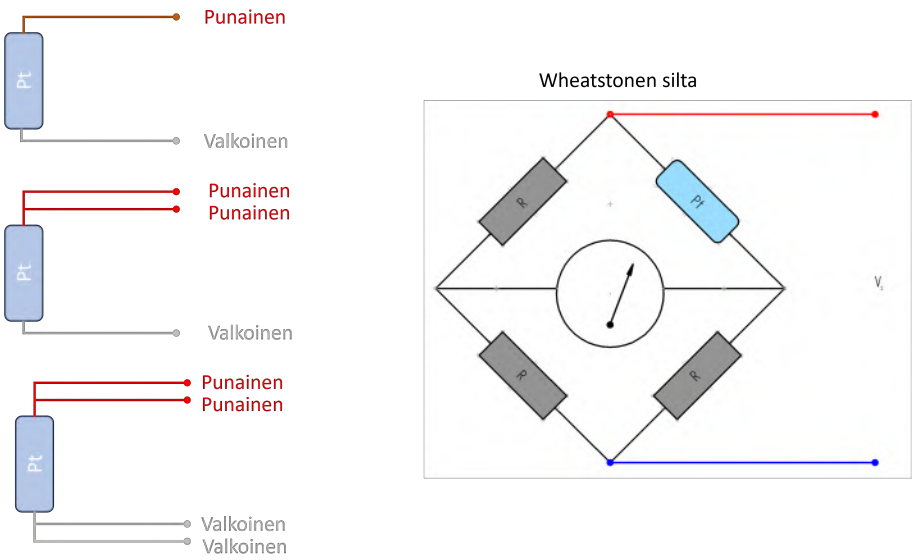
$$R_T = R_0 \left(1 + AT + BT^2 + C(T - 100) \cdot T^3\right) \tag{3.7}$$

$$R_T = R_0 \left(1 + AT + BT^2\right) \tag{3.8}$$

R_T	lämpötilaa vastaava vastus Ω
R_0	vastus lämpötilassa 0 ºC
A	$3{,}9083 \cdot 10^{-3}$
B	$-5{,}7750 \cdot 10^{-7}$
C	$-4{,}1830 \cdot 10^{-12}$

Esimerkki. *Mikä on lämpötilaa 55 ºC vastaava vastusarvo, kun kyseessä on Pt1000 anturi?*
$R_T = 1000 \cdot (1 + 3,9083 \cdot 10^{-3} \cdot 55 - 5,7750 \cdot 10^{-7} \cdot 55^2)$ = *1213,21 Ω*

Lämpötilamittareissa on yleensä valmiina muunnoslaskenta ja ne muuntavat suoraan vastusarvon lämpötilaksi. Periaatteissa yllä olevista yhtälöistä pitäisi ratkaista lämpötila T, koska vastus mitataan ja sen arvo muutetaan lämpötilaksi. Kun lämpötila on nollan yläpuolella, yhtälö 3.8 voidaan ratkaista lämpötilan suhteen, yhtälö 3.9. Alle nollan lämpötila ratkaistaan iteroimalla, yleisin menetelmä on Newton-Raphson menetelmä. Antureiden taulukkoarvot saa helposti netistä hakusanoilla Pt100 table ja Pt1000 table. Platina-antureiden laskureita löydät netistä hakusanoilla 'Temperature sensor calculator'.



Kuva 3.9: Platina-anturin kaksi-, kolmi- ja nelijohdinkytkentä sekä Wheatstonen siltakytkentä

$$T = \frac{-A + \sqrt{A^2 - 4B\left(1 - \frac{R}{R_0}\right)}}{2B} \tag{3.9}$$

Esimerkki. *Platina 100Ω anturin vastus on 123,3Ω, mikä on lämpötila?*
$T = \frac{3{,}9083\cdot10^{-3}+\sqrt{(3{,}9083\cdot10^{-3})^2-4\cdot(-5{,}7750\cdot10^{-7})\left(1-\frac{123{,}3}{100}\right)}}{2\cdot(-5{,}7750\cdot10^{-7})} = 60{,}2\ ^{o}C$

Anturi voi olla tyypiltään joko ohutkalvo- tai lankavastus. Ohutkalvoanturin mittausalue on -50 - +500 ºC ja lanka-anturin lasirunkoisena -196 - +400 ºC sekä keraamirunkoisena -196 - +600 ºC. Anturin kytkennässä on kolme erilaista tapaa, kaksijohdin-, kolmijohdin- tai nelijohdinkytkentä, kuva 3.9. Kun anturin vastusta mitataan, myös mittajohtojen vastus vaikuttaa mittaukseen. Lisäksi johtimienkin vastus muuttuu niiden lämpötilan muuttuessa, jolloin mittaukseen tulee epätarkkuutta. Kaksijohdinmittauksessa tapahtuu aina näin, kolmijohdinmittauksessa voidaan mitata erikseen johtimen vastus ja se voidaan kompensoida tuloksesta. Nelijohdinmittauksessa johtimien epäsymmetria voidaan lisäksi kompensoida. Mittaus voi tapahtua joko suoraan vastusmittauksena tai sitten käytetään hyväksi wheatstonen siltakytkentää, jossa on Pt-anturin lisäksi kolme vakiovastusta. Vastusmittaus lämmittää hieman vastusta ja se ei ole yhtä tarkka kuin wheatstonen siltakytkentä.

Virheiden pienentämiseksi kaksijohdinmittausta ei suositella yli 250 mm johtimille, kolmijohdinmittausta yli 30 m johtimille ja nelijohdinmittausta yli 1000 m johtimille. Pt1000 anturin vastus on suurempi ja johdinten aiheuttama virhe on vähäisempi.

Pt100 antureiden tarkkuusluokkia on taulukossa 3.3. Pt100 antureiden tarkkuus on muihin lämpötila-anturityyppeihin verrattuna parempi.

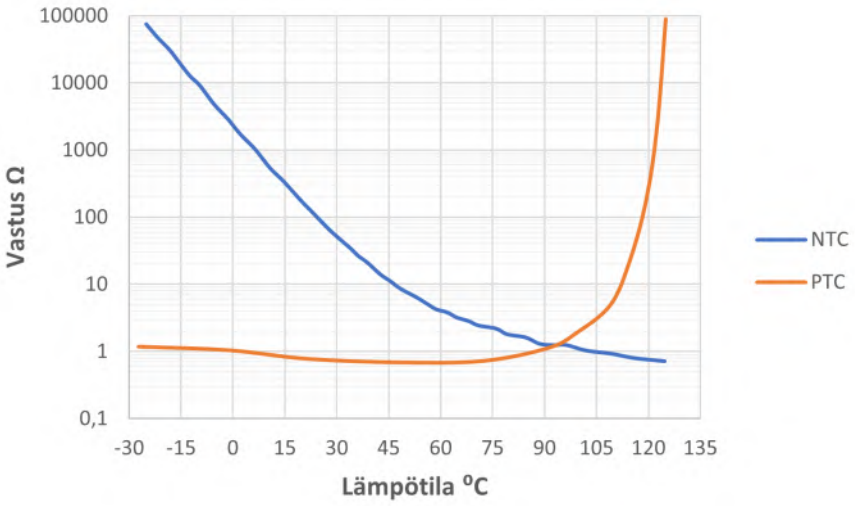
Taulukko 3.3: Pt100 antureiden tarkkuusluokat [IEC 60751]

	Luokka AA	Luokka A	Luokka B	Luokka C
Lankavastuksen alue ºC	-50 ... +250	-100 ... +450	-196 ... +600	-196 ... +600
Ohutkalvovastuksen alue ºC	0 ... +150	-30...+300	-50 ... +500	-50 ... +600
Epävarmuuden yhtälö ºC	±(0,1 + 0,0017·T[1])	±(0,15 + 0,002·T[1])	±(0,3 + 0,005·T[1])	±(0,6 + 0,01·T[1])

[1]T on lämpötilan itseisarvo

Esimerkki. *Mikä on luokan A anturin epävarmuus -90 ºC lämpötilassa?*
Epävarmuus on ±(0,15 + 0,002·|-90|) = ± 0,33 ºC. Epävarmuus on sama myös +90 ºC lämpötilassa.

Kuva 3.10: Esimerkki aluslevyksi muotoillusta termistorista



Kuva 3.11: Esimerkki NTC ja PTC termistorin vastuksen riippuvuus lämpötilasta

3.4 Termistori

Termistori (THERMISTOR, THERMally sensitive resISTOR) on myös vastusanturi. Metallin sijaan siinä on materiaalina jauhettuja metallioksideja, jotka on puristettu muotoonsa ja lämpökäsitelty. Termistorin ominaisuudet muuttuvat sen mukaan mitä aineksia seoksessa käytetään. Tyypiltään termistorit ovatkin enemmän puolijohteen tyyppisiä. Termistoreja on kahta eri päätyyppiä, NTC (Negative Temperature Coefficient) ja PTC (Positive Temperature Coefficient). NTC termistorin vastus pienenee lämpötilan noustessa ja PTC anturissa kasvaa. Mittauksissa käytetään yleisimmin NTC tyyppiä. Termistorin epävarmuus on luokkaa ± 0,05 ... ± 1,5 °C ja ne ovat kestäviä, stabiileja, muokattavissa eri mallisiksi ja halpoja. Kuvassa 3.10 on esimerkki aluslevyksi muotoillusta anturista. Lämpötila-alue on -55 ... 300 °C. Epoksipintaisten yläraja on 150 °C ja lasipintaisten 300 °C. Niiden vastusarvot ovat tyypillisesti 2 000 ... 200 000 Ω 25 °C lämpötilassa. Kuvassa 3.11 on esimerkki termistorin vastuksen riippuvuus lämpötilasta.

Termistoreita ei ole samalla lailla standardoitu kuin muita lämpötila-antureita ja sen takia voidaan joutua määrittämään laskentayhtälöiden kertoimet jokaiselle tyypille erikseen valmistajan antamista tiedoista. Yksittäisissä lämpömittareissa nämä muunnokset ovat mittalaitteessa valmiina, tiedonkeruulaitteissa ja harrastelaitteissa (esim. Arduino) voi tarvita näitä kertoimia ja yhtälöitä.

NTC termistorin vastuksen laskennassa käytetään usein Beta-yhtälöä, uhtälö 3.10.

$$R_T = R_0 e^{\beta(1/T - 1/T_0)} \tag{3.10}$$

R_T	lämpötilaa T vastaava vastus Ω
R_0	vastus referenssilämpötilassa
β	Kerroin, usein väliltä 3500 - 4600 K
T	Mitattu lämpötila [K]
T_0	Referenssilämpötila [K]

Esimerkki. *Termistorin kerron β on 25 °C lämpötilassa 4000 K ja vastus 5000 Ω, mikä on vastus 100 °C lämpötilassa?*
Laskuissa käytetään lämpötilan yksikkönä Kelvin asteita, T=100+273,15 = 373,15 K ja T_0=25+273,15 =298,15 K. $R_T = 5000 \cdot e^{4000 \cdot \left(\frac{1}{373,15} - \frac{1}{298,15}\right)} = 337\ \Omega$

Kun halutaan laskea mitatusta vastuksesta lämpötila T, yhtälöstä 3.10 ratkaistaan lämpötila T, yhtälö 3.11.

$$T = \frac{1}{\frac{1}{T_0} + \frac{1}{\beta} ln\left(\frac{R_T}{R_0}\right)} \tag{3.11}$$

Kertoimesta β käytetään myös nimeä Beta-kerroin tai B-kerroin. Se voidaan määrittää kahden lämpötilan ja niitä vastaavien vastusten mukaan yhtälön 3.12 mukaisesti.

$$\beta_{T_1/T_2} = \frac{T_2 \cdot T_1}{T_2 - T_1} ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right) \tag{3.12}$$

Lyhyellä lämpötilavälillä β- kertoimen virhe pysyy pienenä, mutta laajemmalla lämpötila-alueella virhe kasvaa. Kuvan 3.11 mukaan lämpötila-vastus riippuvuus ei ole lineaarinen.

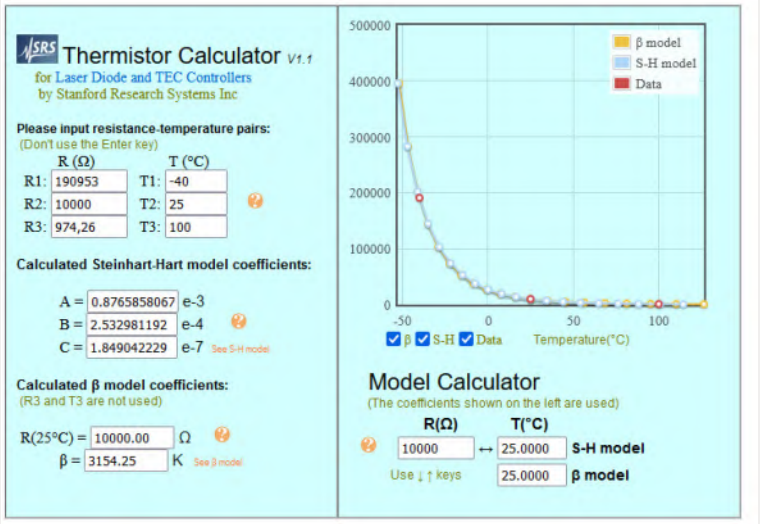
Esimerkki. *Termistorin vastus 25 ˚C lämpötilassa on 10 kΩ ja 100 ˚C lämpötilassa 973 Ω. Mikä on β-kerroin?* T_1*=25+273,15 = 298,15 ja* T_2*= 100+273,15 = 373,15.* $\beta_{25/100} = \frac{373,15 \cdot 298,15}{373,15-298,15} ln\left(\frac{10000}{973}\right) = 3456$

Esimerkki. *Termistorin datalehdessä on annettu sille seuraavat tiedot.* $\beta_{25/85}$*= 4570 K. Mikä on mitattu lämpötila, kun vastus* R_0*= 6000 Ω ja R = 1120 Ω ?*
Referenssilämpötila on 25 ˚C = 298,15 K. $T = \frac{1}{\frac{1}{298,15} + \frac{1}{4570} \cdot ln\left(\frac{1120}{6000}\right)} = 334,8$ *K => 61,7 ºC.*

Eksponenttiyhtälön lisäksi käytössä on muitakin tarkempia laskentapoja. Esimerkiksi Steinhart-Hart yhtälön (yhtälö 3.13) virhe on -50 ... +150 ˚C lämpötila-alueella normaalista ± 0,15 ˚C. Yhtälön kertoimet saadaan termistorin datalehdestä tai ne voidaan laskea valmistajan antamista taulukkotiedoista. Laskentaa varten löydät netistä laskimia hakusanalla thermistor calculator.

$$\frac{1}{T} = A + B \cdot ln(R) + C \cdot (ln(R))^2 \tag{3.13}$$

Esimerkki. *Termistorin referenssilämpötilaa 25 ˚C vastaava vastusarvo on* R_0*= 10 kΩ Termistorin datalehdessä on annettu lämpötila - vastus arvot. Poimitaan näistä kolme, alin (190 953 Ω/-40 ˚C), 25 ˚C (10 000 Ω/25 ˚C) ja korkein piste (972,46 Ω/100 ˚C). Syötetään nämä laskuriin, jolloin saadaan β = 3154,25 K ja Steinhart-Hart yhtälön kertoimet ovat A=0,8765858067·10*$^{-3}$*, B=2,23298112·10*$^{-4}$*ja C=1,849042229·10*$^{-7}$*.*

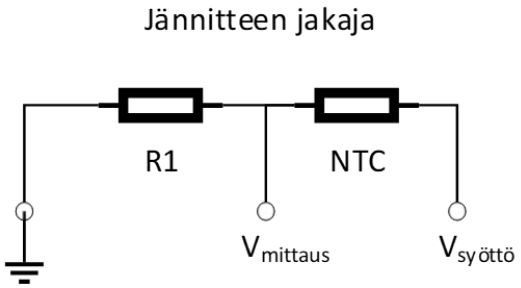


Mikä on lämpötila, kun vastusarvo on 1120 Ω?
Käytetään ensin yhtälöä 3.11, $T = \frac{1}{\frac{1}{298,15} + \frac{1}{4570} \cdot ln\left(\frac{1120}{10000}\right)}$*=375,96 K = 102,8 ˚C. Lasketaan sama Steinhart-Hart yhtälöllä 3.13,* $\frac{1}{T} = 0,8765858067 \cdot 10^{-3} + 2,23298112 \cdot 10^{-4} \cdot ln(1120) + 1,849042229 \cdot 10^{-7} \cdot ln(1120)^2 = 0,002664127$ *1/K => T = 375,4 K = 102,2 ˚C. Yhtälöt antavat tässä lämpötilassa lähes samat tulokset.*

Lämpötilan mittauksen lisäksi termistoreja käytetään esimerkiksi sähkömoottoreiden käynnistysvirran rajoittamiseen. Kylmän termistorin vastus on suuri, jolloin sen läpi kulkeva virta on pieni (I=U/R). Termistorin lämmetessä vastus pienenee ja virta kasvaa. PTC termistoreja käytetään moottorin suojaukseen, lämpötilan

noustessa vastus kasvaa ja tästä saadaan viesti moottorin ohjaukselle. Termistoria voidaan myös käyttää termostaatin tapaan lämmityksen ohjaukseen tai jopa lämmityselementtinä.

Tiedonkeruulaitteissa tai mikrokontrollerikehitysalustoissa termistoreille ei ole välttämättä omaa kytkentää tai niissä ei voida mitata vastusta, mitä mittauksessa tarvitaan. Mittaus voidaan tehdä tällöin jännitteen jakopiirin avulla, kuva 3.12. Termistorin kanssa sarjaan laitetaan samaa suuruusluokkaa oleva vastus.



Kuva 3.12: Termistorin mittaus jännitteenjaon avulla

Piiriin kytketään vakiojännitettä antava jännitelähde ja mitataan termistorin aiheuttamaa jännitehäviötä, joka muuttuu lämpötilan (vastuksen) muuttuessa. Tämän kytkennän ongelmana on termistorin oma lämpeneminen etenkin, jos kokonaisvastus on pieni. Jännitteenjakajan mittausjännite $V_{mittaus}$voidaan laskea yhtälön 3.14avulla.

$$V_{mittaus} = V_{syöttö}\frac{R_{NTC}}{R_{NTC} + R_1} \tag{3.14}$$

$V_{mittaus}$	Mitattausjännite
$V_{syöttö}$	Syöttöjännite
R_{NTC}	Termistorin vastus
R_1	Kiinteä vastus

Esimerkki. *Termistorin nimellisvastus 25 ˚C lämpötilassa on 5 kΩ ja β arvo on 3520 K. Termistori kytketään kuvan 3.12 mukaisesti siten, että vastus R_1on 5 kΩ ja syöttöjännite on 3,3 V. Mikä on kytkennässä kulkeva virta ja mitattu jännite kun lämpötila on 25 ˚C ja 85 ˚C?*
Kun lämpötila on 25 ˚C, piirin kokonaisvastus on 5 kΩ + 5 kΩ = 10 kΩ. Piirin läpi kulkeva virta on I=U/R => $I = \frac{3,3}{10000}$ = 0,00033 A. Jännite on U=IR => $U = 0,00033 \cdot 5000$ = 1,65 V. Kun lämpötila on 85 ˚C, termistorin vastus voidaan laskea yhtälön 3.10 avulla, $R_T = 5000e^{3520(\frac{1}{85+273,15} - \frac{1}{25+273,15})}$= 692 Ω. Piirin kokonaisvastus on 5692 Ω ja sen läpi kulkeva virta on $I = \frac{3,3}{5692}$ = 0,00058A. Termistorin jännitehäviö on $U = 0,00058 \cdot 692$ = 0,40 V. Termistorin tehohäviö on P=I^2R ja 85 ˚C lämpötilassa se on $P = 0,00058^2 \cdot 692$ = 0,000233 W.

Anturin vastus R_{NTC} voidaan ratkaista yhtälöstä 3.14, yhtälö 3.15

$$R_{NTC} = \frac{V_{mittaus} \cdot R_1}{V_{syöttö} - V_{mittaus}} \tag{3.15}$$

Esimerkki. *Jännitejakoa käytettäessä saatiin edellisen tehtävän termistorin ylii mitatuksi jännitteeksi 2,5 V. Mikä on lämpötila?*
Lasketaan ensin mikä on mittaustilanteessa termistorin vastus, $R_{NTC} = \frac{3,3 \cdot 5000}{3,3-2,5}$ = 15625Ω. Lasketaan yhtälön 3.11 avulla lämpötila $T = \frac{1}{\frac{1}{298,15} + \frac{1}{3520} \cdot ln\left(\frac{5000}{15625}\right)}$ = 330 K, 57 ºC.

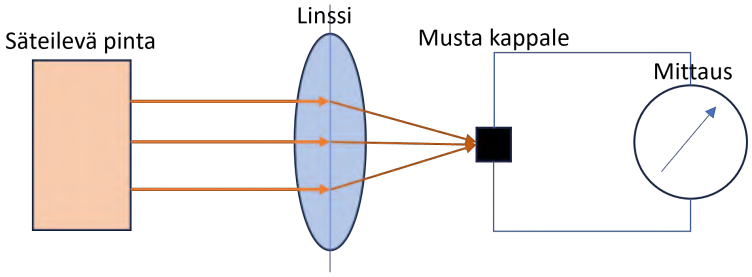
Jännitteen jakoa voidaan käyttää yleisesti vastuksen mittaukseen jännitteen avulla tai esimerkiksi mittausjännitteen alentamiseen, jos esimerkiksi anturi antaa maksimissaan 10 V jännitteen ja tiedonkeruun suurin sallittu mittausjännite on 5 V.

3.5 Pyrometri, infrapunalämpömittari ja lämpökamera

Kaikki materiaalit, joiden lämpötila on yli 0 ˚K lähettävät lämpösäteilyä. Pyrometrejä (pyrometer) on kahta päätyyppiä, optinen- ja infrapunapyrometri (infrapunalämpömittari, infrared thermometer). Näistä jälkimmäinen on yleisemmin käytetty. Lämpösäteily on infrapunan aaltoalueella. Infrapunalämpömittarin periaate on esitetty

kuvassa 3.13. Pinnan säteily kohdistetaan linssin avulla mustaan kappaleeseen ja yksinkertaisemmillaan tämän lämpötila mitataan. Mittaus on kosketukseton ja sen avulla on helppo mitata korkeita lämpötiloja myös hankalista paikoista. Infrapunalämpömittarin periaatteena voi myös olla säteilyn valonvoimakkuuden mittaaminen. Valokennon edessä on suodatin, joka päästää vain tietyn aaltoalueen lävitseen. Suodatetun valon voimakkuus kertoo pintalämpötilan. Lisää pyrometrien toimintatavoista voit lukea esimerkiksi explainthatstuff sivustolta tai julkaisusta [Wecktsröm 2005].

Infrapunalämpömittarit (Infrared thermometer, IRT) ovat kädessä pidettäviä pistoolimaisia laitteita, jossa on usein laserkohdistin, jonka avulla mittaus voidaan kohdistaa oikeaan kohtaan.

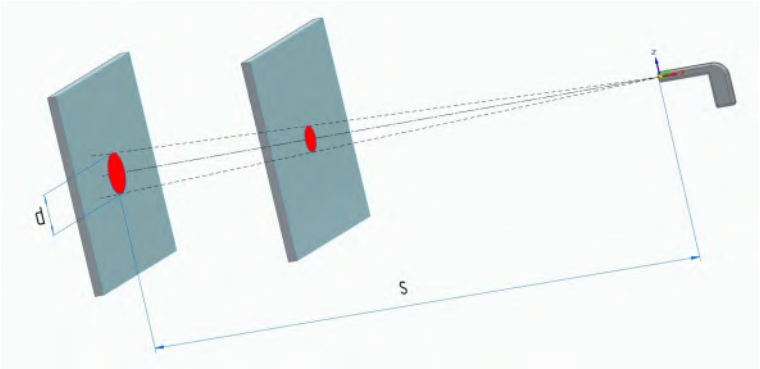


Kuva 3.13: Infrapunalämpömittarin periaate

Mitattavan pinnan materiaali ja ominaisuudet vaikuttavat pyrometrin toimintaan, kiiltävä pinta heijastaa säteilyä ja tämä on huomioitava mitattaessa. Pinnan ominaisuuksista pyrometreja käytettäessä käytetään nimeä emissiviteetti. Emissiokerroin on pinnan tietyssä lämpötilassa lähettämän lämpösäteilyn ja vastaavassa lämpötilassa olevan mustan kappaleen lämpösäteilyn suhde. Kerroin on nollan ja yhden välillä. Useimpien pintojen emissiokerroin on 0,85 - 0,9, metallien 0,2 - 0,5 ja kullan, hopean ja alumiinin 0,02 - 0,04. Kalleimmissa pyrometreissa kerrointa voidaan muuttaa pinnan laadun mukaan.

Pyrometrin käytössä on muistettava, että mitä kauempana mitattava kohde on, sitä suuremmalta alueelta mittaus tapahtuu, kuva 3.14. Mittari kohdistetaan laserpisteen avulla, mutta se ei kerro mittausalueen suuruutta. Alueen suuruus ilmoitetaan distance to spot suhteen avulla (d:s ratio).

Esimerkki. *Infrapunalämpömittarin d:s suhde on 20:1, Mittausetäisyys on 2m, kuinka suuri on mittauspiste? Mittausalueen halkaisija on* $\frac{2000mm}{20} = 100$ *mm.*

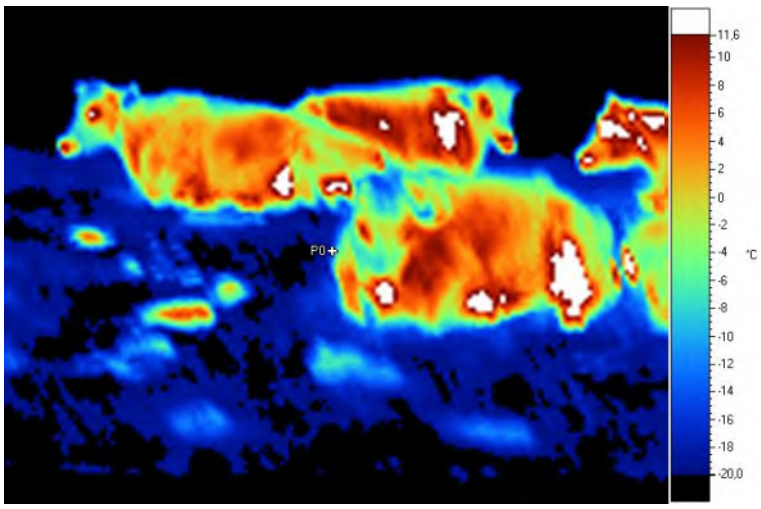


Kuva 3.14: Mittausalueen koon riippuvuus mittausetäisyydestä

Lämpökamerassa (thermal camera) on infrapunasäteilylle herkkä kennosto, joka mittaa pintojen säteilyä laajemmalta alalta samalla lailla kuin normaali kamera ottaa kuvan. Kuvassa 3.15 on esimerkki kylmällä alustalla makaavista lehmistä otettu lämpökamerakuva. Värin perusteella voi lukea pintalämpötilat.

3.6 Digitaaliset lämpötila-anturit

Digitaalisissa lämpötila-antureissa on yhdistetty lämpötila-anturi ja analogi-digitaali muunnin. Mitattu lämpötila muunnetaan anturissa numeroarvoksi ja se lähetetään tietoväylää pitkin eteenpäin. Tätä menetelmää käytetään mikroprosessoripohjaisissa järjestelmissä ja myös harrastelijoille ja opetukseen tarkoitetuissa arduino ja raspberry pi mikroprosessorisarjoissa. Digitaaliset anturit toimivat digitaalisten väylien avulla. Näistä I^2C väylä (bus) on yleisesti käytössä.



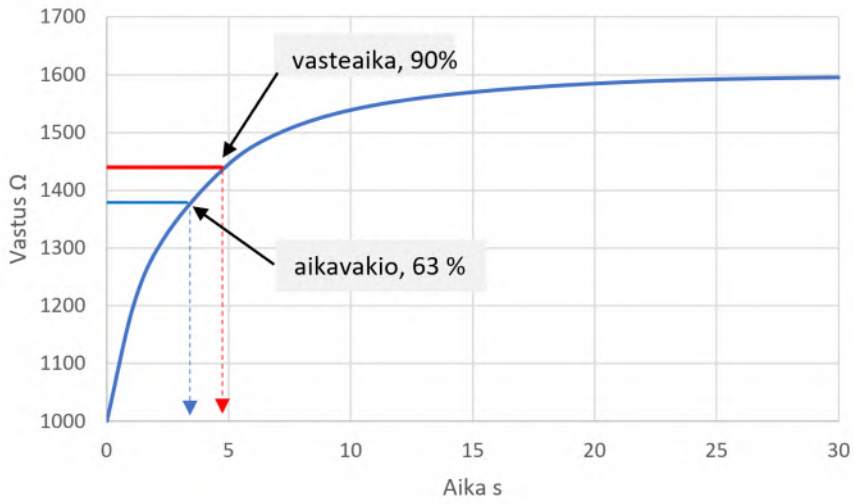
Kuva 3.15: Lämpökameran kuva makaavista lehmistä

3.7 Lämpötila-anturin muutosnopeus

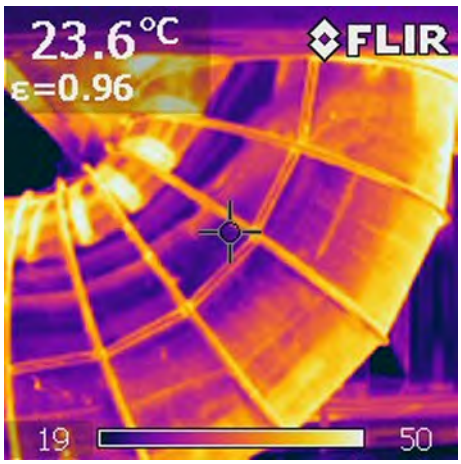
Antureilla on aina omat hitautensa, ne eivät pysty seuraamaan lämpötilanmuutoksia nopeasti. Anturin massa ja asennus vaikuttaa siihen kuinka nopeasti arvo muuttuu olosuhteiden muuttuessa. Jos anturi on asennettu suojaputkeen, kestää aikansa ennenkuin lämpötilan muutos johtuu suojaputken lävitse. Myös anturin massa hidastaa sen lämpenemistä. Tätä voidaan myös käyttää hyväksi eräänlaisena suodattimena. Jos lämpötila lukema vaihtelee jatkuvasti ja haluttaisiin lukea enemmänkin keskiarvoja, silloin voidaan anturiin liittää esimerkiksi pieni metallipala, joka hidastaa anturin lämpötilan muutosta. Esimerkiksi nesteiden ja kaasujen virtausmittauksissa tämä voi olla tarpeen. Lämpötilan muutosnopeuteen (response rate) vaikuttaa anturin massa, muoto, suojataskun materiaali ja mitataanko esimerkiksi nesteen tai kaasun lämpötilaa.

Anturin muutosnopeus voidaan mitata käyttämällä vaikka kahta erilämpötilaista nestettä. Anturi siirretään nesteestä toiseen ja seurataan kuinka nopeasti lämpötila muuttuu. Vastusantureiden aikavakio on nesteessä 0,5 - 1 min luokkaa ja ilmassa muutaman minuutin luokkaa. Termoparin mittapiste on pieni ja sen aikavakio on ilmassa paljaana alle minuutin. Taskuun sijoitettuna aikavakio on muutaman minuutin luokkaa.

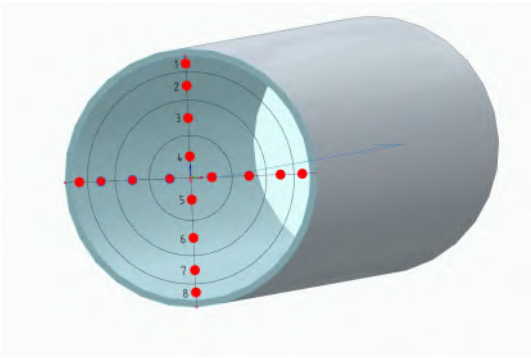
Kuvassa 3.16 on esimerkki Pt1000 anturin muutosnopeudesta. Anturi on siirretty 0 °C lämpötilasta kuumaan astiassa olevaan öljyyn, jonka lämpötila on ollut n 160 °C. Muutosnopeudelle käytetään yleisesti kahta eri termiä, aikavakiota (time constant), jolloin on saavutettu 63% lopullisesta arvosta ja vasteaikaa (response constant), jolloin on saavutettu 90% lopullisesta arvosta. Aikavakiona on tässä tapauksessa 1380 Ω kohta, jolloin on saavutettu 63 % lopullisesta arvosta 1600 Ω. Anturin aikavakio on tässä tapauksessa 3,3 s luokkaa. Lopullisen arvonsa anturi on saavuttanut n 30 s kuluttua. Vasteajan määrityksessä käytetään kohtaa, joka on 90% lopullisesta arvosta ja vasteaika on 4,4 s.



Kuva 3.16: Pt 1000 anturin muutosnopeus



Kuva 3.17: Esimerkki kuivurin ilmaputken pintalämpötiloista



Kuva 3.18: Esimerkki poikkipinnan jakamisesta segmentteihin

3.8 Lämpötila-anturin asennustapa

Edellä on jo ollut esimerkkejä erityyppisistä anturiasennuksista. Osassa mittauksia antureita voidaan käyttää suoraan, vaativimmissa paikoissa ne joudutaan asentamaan suojaputkiin. Alle 600 ^{o}C lämpötiloissa käytetään teräksestä tai kuparista valmistettuja suojaputkia. Lämpötilan ollessa 600 - 1200 ^{o}C käytetään seostettuja teräksia ja yli 1200 ^{o}C käytetää keraamisia suojia. Prosessiputkistoon on myös mahdollista sijoittaa antureita varten laippoja. Niiden etuna on vaihdettavuus ilman, että putkistoja jouduttaisiin tyhjentämään. Kun anturin massa lisääntyy, tämä tarkoittaa aina hitaampaa muutosnopeutta.

Pintalämpötilan mittauksissa anturi on saatava hyvään kosketukseen pinnan kanssa. Lisäksi anturin kiinnistyskohta kannattaa lämpöeristää, koska esimerkiksi putkiston ja ympäristön lämpötilaero voi olla suuri. Tällöin putken pinta on kylmempi kuin sisällä virtaavan aineen lämpötila.

Nesteiden lämpötilamittaus on helppoa, koska nesteen ja anturin lämmönsiirto on hyvä. Kaasujen mittauksessa näin ei ole. Lisäksi kaasujen lämpötilat vaihtelevat sen mukaan mistä kohtaa putkistoa tai kanavaa ne mitataan. Tällöin pitää tehdä monipistemittauksia kanavan poikkipinta-alalta. Kuvassa 3.17 on esimerkki viljankuivurin ilmaputken pintalämpötiloista mutkan kohdalta. Pintalämpötila on ollut suurimmillaan 50 ^{o}C mutkan ulkokaarteessa. Virtaus törmää tänne ja aiheuttaa pinnan lämpenemisen.

Mitattaessa kanava tai putki voidaan jakaa segmentteihin ja kunkin segmentin lämpötilat mitataan. Kuvassa 3.18 putken poikkipinta-ala on jaettu neljään segementtiin ja kunkin segmentin lämpötila mitataan neljästä kohtaa. Pisteet voivat olla samoja, joita käytetään esimerkiksi ilmanvaihtokanavien mittaamisessa. Näistä on olemassa omat mittausstandardit.

Kaasujen mittauksissa pitää myös valita mittauspaikka mahdollisimman häiriöttämästä kohdasta. Mittauspiste pitäisi olla paikassa, jossa on suora putkiosuus. Mutkat ja putken koon muutokset aiheuttavat aina häiriöitä kuvan 3.17 esimerkin mukaisesti.

Antureiden asentamisessa pitää ottaa myös huomioon säteilylämpötilat. Ulkoilman lämpötilat ilmoitetaan aina varjossa ja niissä käytetään suojaa, joka estää auringon säteilyn vaikutuksen. Kun mitataan ilmalämmittimiä, niissä on säteileviä pintoja, vastuksia tai lämmönvaihtimen osia. Niissä pitää huolehtia, etteivät säteilevät pinnat vääristä mittauksia. Anturit pitää joko suojata säteilyltä tai sijoittaa siten, että säteily ei osu niihin.

Luku 4

Paineen mittaaminen

Paine voi olla absoluuttinen paine, vallitseva ilmanpaine, ylipaine tai alipaine. Suurin osa mittauksista tehdään vallitsevan ilmanpaineen suhteen eli verrataan mitattua painetta sillä hetkellä mittauspaikalla olevaan ilmanpaineeseen. Absoluuttinen paine ilmaisee paineen tyhjiöön verrattuna. Ilmanpaine ilmoitetaan absoluuttisena paineena eli tyhjiöön verrattuna (paine on nolla tyhjiössä). Ylipaine ilmaiseen paineen vallitsevaan ilmanpaineeseen verrattuna. Samoin alipaineen vertailukohta on vallitseva ilmanpaine ja lukema ilmoittaa kuinka paljon ollaan sen alapuolella. Paine-ero saadaan mittaamalla kahden paineen ero.

Paine voidaan mitata taulukon 4.1 mukaisilla mittalaitteilla

Taulukko 4.1: Paineen mittalaitteita

Laite	**Toimintaperiaate**	**Käyttö**
U-paine-eromittari (manometri)	Nesteen korkeusero	Laboratoriot, vesiputkistot, ilmaputkistot
Mekaaninen painemittari (Bourdon-putkimittari)	Mekaaninen putken muodonmuutos	Teollisuus, hydrauliikka, paineen tarkkailuun, ei tarvi sähköä
Kapasiitiivinen anturi	Sähkökapasitanssin muutos	Elektroniikka, mikroanturit
Pietsosähköinen anturi	Materiaalin varausmuutos	Nopeat mittaukset
Venymäliuska-anturi (strain gauge)	Vastuksen muutos	Monikäyttöinen, tarkka

4.1 Nestepatsasmanometri

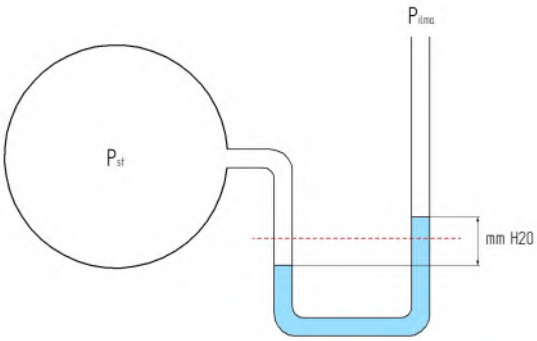
Yksinkertaisin paineen mittalaite on nestepatsasmanometri (liquid column manometer), kuva 4.1. Letku tai putki täytetään vedellä ja toinen pää on yhdistetty virtauskanavaan ja toinen on avoinna ja siihen vaikuttaa ulkoilman paine. Kun virtauskanavassa on paine, se nostaa nestepatsasta ja päiden tasojen välinen ero voidaan mitata metrimitalla. Paine voidaan laskea yhtälöllä 4.1. Kun virtaavana aineena on ilma, sen tiheys on veden tiheyteen verrattuna pieni ja se voidaan jättää huomioimatta. Tästä yksinkertaisesta painemittarista on peräisin paineyksiköt mm vesipatsasta tai mm Hg (elohopea). Yksi mm vesipatsasta on 9,81 Pa ja 1 mm elohopeaa 133,3 Pa.

$$p_{st} = (r - r_{ilma}) \cdot g \cdot h \tag{4.1}$$

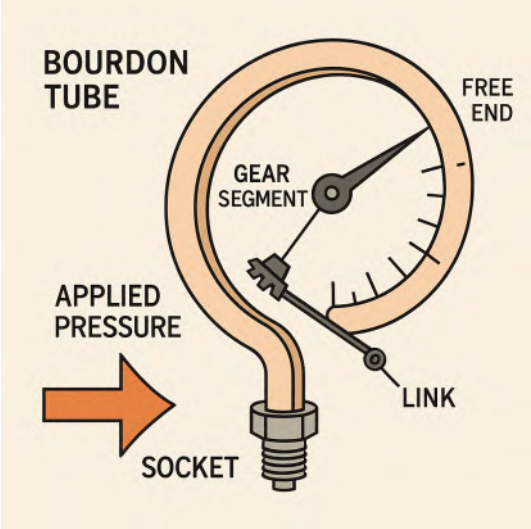
r	Nesteen tiheys, vesi 1000 kg/m^3
r_{ilma}	Ilman tiheys, 15 ° lämpötilassa $r_0 = 1,226$ kg/m^3
g	Maan vetovoiman kiihtyvyys, 9,81 m/s^2
h	Nestepintojen korkeusero

Esimerkki. *Kuivurin puhallusputkeen asennetaan vedellä täytetty nestepatsasmittari. Tasojen väliseksi eroksi mitataan 48 mm. Mikä on kuivurin aiheuttama vastapaine?*
48 mm vesipatsasta muutetaan yksikköön Pa. Käytetään muunnokseen 9,81 sijasta 10, tästä aihautuva virhe on pieni. Saadaan tulokseksi 480 Pa.

Netistä löytyy myös nestepatsasmanometrille laskureita hakusanoilla 'manometer calculator'.



Kuva 4.1: Nestepatsasmanometri



Kuva 4.2: Bourdon putki, ChatGPT piirtämä kuva

4.2 Mekaaniset painemittarit

Mekaaniset painemittarit (pressure gauge) perustuvat Boudonin putkeen, kuva 4.2. Putki on C-muotoinen litteä metalliputki. Toisesta päästä syötetään paine sisään ja suljettuun päähän on yhdistetty mekaaninen viisarikoneisto. Paine pyöristää ja oikaisee putkea. Vällitysmekanismi saa viisarin liikkumaan. Paineputkeen voidaan yhdistää kuristus. Jos viisarin liike on rauhaton, kuristusta lisätään, kunnes viisarin liike rauhoittuu. Mittari soveltuu 0,6 - 1000 bar paineisiin ja rakenne on luotettava ja yksinkertainen.

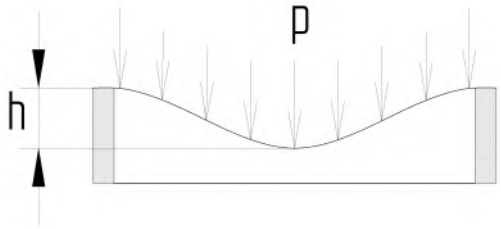
4.3 Kapasitiivinen anturi

Kapsitiivisessa anturissa (capacitive pressure gauge) on sisällä kaksi kalvoa, jotka muodostavat kondensaattorin (yleensä metallilevyt tai kalvo ja vastalevy). Kun paine kohdistetaan joustavaan kalvoon, se liikkuu kohti tai poispäin kiinteästä vastalevystä. Tämä muuttaa levyjen välistä etäisyyttä, jolloin kapasitanssi muuttuu, kuva 4.3.

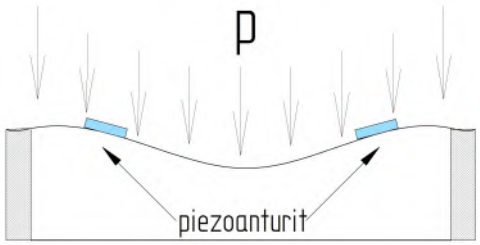
Kapasitiiviset anturit ovat herkkiä ja tarkkoja sekä niiden stabiilisuus on hyvä. Tyypillinen mittausalue on 1 mbar - 10 bar. Käytetään usein terveysteknologiassa, ilmailu- ja avaruustekniikassa ja pienten paineiden mittaamiseen.

4.4 Pietsosähköinen anturi

Kun pietsosähköiseen materiaaliin kohdistuu mekaaninen rasitus (paine, voima tai kiihtyvyys), se polarisoituu ja muodostaa sähkövarauksen. Tämä varaus kerätään ja muunnetaan jännitteen tai sähkövirran muodossa mitattavaksi signaaliksi. Pietsoanturit on kiinnitetty kalvoon ja kalvon muodonmuutos saa aikaiseksi antureiden muodonmuutoksen mikä aikaansaa varauksen, kuva 4.4.



Kuva 4.3: Kapasitiivinen paineanturi

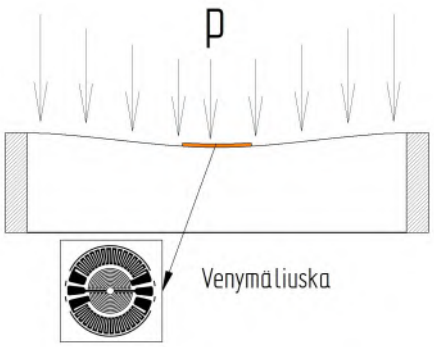


Kuva 4.4: Pietsosähköinen paineanturi

Pietsopaineanturilla (piezoelectric pressure sensor) on nopea vasteaika ja se soveltuu dynaamisiin mittauksiin, kuten iskujen, värähtelyjen ja nopeasti muuttuvien paineiden mittaamiseen. Anturilla on laaja taajuusvaste ja se toimii hyvin korkeilla taajuuksilla jopa useiden MHz taajuuksilla. Se pystyy myös mittaamaan hyvin pieniä muutoksia. Anturi ei sovellu staattiseen paineen mittaukseen, koska vain muuttuva paine aiheuttaa varauksen. Pysyvä paine aiheuttaa vain hetkellisen signaalin. Käytetään iskun, räjähdyksen tai nopeiden painepulssien mittaamiseen, kuten moottorien palotilan paineanturina.

4.5 Venymäliuska-anturi

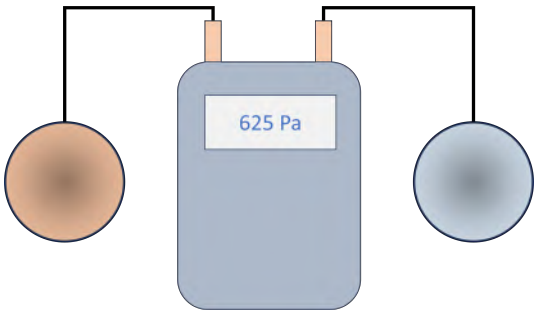
Venymäliuska-anturi perustuu myös kalvon muodonmuutokseen. Sen pintaan liimataan kalvorusettiliuska (membrane rosette), kuva 4.5. Kalvon muodonmuutos aikaansaa muutoksen venymäliuskan vastukseen, joka muunnetaan painearvoksi. Venymäliuskapaineantureiden mittausalue on laaja ja niitä käytetään yleisesti hydrauliikan, pneumatiikan ja prosessiteollisuuden mittauksissa.



Kuva 4.5: Venymäliuskakalvoanturi

4.6 Mikromanometri

Virtausmittausten paineet ovat pieniä, yleensä vain kymmenien tai satojen Pa luokkaa. Pieniä paineita mittaavia mittalaitteita kutsutaan mikromanometreiksi (micromanometer). Kuvassa 4.6 on esimerkki mikromanometristä.



Kuva 4.6: Mikromanometri

Se on usein kädessä pidettävä laite, jossa on kaksi mittausyhdettä. Kuvassa nämä on yhdistetty eri paineisiin, jolloin mitataan paine-eroa. Jos mitataan vain yhdellä yhteellä ja toinen on vapaana, silloin mittaus tapahtuu vallitsevan ilmanpaineen suhteen. Mikromanometrissä on yleensä 'älyä' mukana, jolloin esimerkiksi paineen yksikkö voidaan valita, mittaustulokset voidaan tallentaa ja laite voi laskea ilmamäärät. Mikromanometrissä käytetään usein kapasitiivisiä antureita.

Luku 5

Virtausmittaukset

Virtausmittaukset voivat olla joko tilavuusvirtamittauksia (volume flow) tai massavirtamittauksia (mass flow). Virtauksessa nesteitä tai kaasuja virtaa jatkuvasti paikasta toiseen ja ne kuljettavat mukanaan lämpöä tai energiaa. Keskuslämmityksessä kuuma vesi siirtää lämpöä lämmönlähteestä käyttötiloihin. Kuivurissa kuuma ilma siirtyy uunista kuivaussiiloon. Moottoreissa ja lämmityslaitteissa polttoaine virtaa toimilaitteeseen. Tilavuusvirran mittaaminen on massavirran mittaamista helpompaa, mutta siinä joudutaan usein muuttamaan tilavuusvirta massavirraksi, jonka jälkeen voidaan laskea esimerkiksi tehoja. Tällöin tarvitaan kyseisen nesteen tai kaasun lämpötila ja myös tiheysarvo. Tiheys ja ominaislämpökapasiteetti riippuvat lämpötilasta ja paineesta. Tarkoissa mittauksissa myös tämä on otettava huomioon. Massavirta on yksiselitteinen, kun taasen tilavuusvirta muuttuu lämpötilan muuttuessa. Kuivuriuunin imuvirta on pienempi kuin kuivausilma, ilma laajenee uunissa lämpötilan kasvaessa.

5.1 Virtauksen perusteet

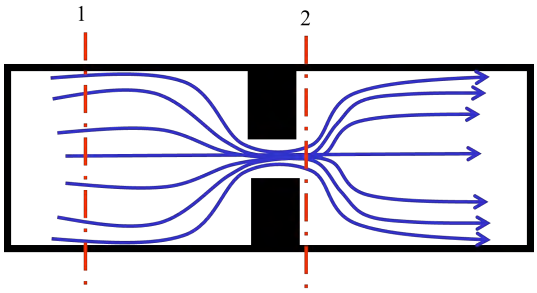
Virtaukseen pätee Bernoullin lait. Tarkastellaan suppenevaa putkea kahdessa poikkileikkauskohdassa 1 ja 2, kuva 5.1. Sama virtaus q_v kulkee sekä poikkileikkausalan 1 että 2 läpi. Tästä saadaan yhtälö 5.1. Sen mukaan suppeneva aukko aiheuttaa suurentuva virtausnopeuden ja laajentuva pienenevän.

$$q_{v1} = q_{v2} \Rightarrow A_1 v_1 = A_2 v_2 \Rightarrow v_2 = \frac{A_1}{A_2} v_1 \tag{5.1}$$

Esimerkki. *Kuivurin puhallusputken halkaisija muuttuu 500 mm putkesta 400 mm putkeen. Miten nopeus muuttuu, jos uunin tilavuusvirtaus on 22 000 m^3/h?*

Ilman nopeus suuremmassa putkessa on $v_1 = \frac{q_v}{A_1} = \frac{\frac{22000}{3600} m^3/s}{\frac{\pi \cdot 0,5^2}{4} m^2} = 31,1$ *m/s ja pienemmässä* $v_2 = 31,1 \frac{\frac{\pi \cdot 0,5^2}{4}}{\frac{\pi \cdot 0,4^2}{4}} = 48,6$ *m/s.*

Bernoullin yhtälö on muotoa $p_1 + rgh_1 + \frac{rv_1}{2} = p_2 + rgh_2 + \frac{rv_2}{2} + \Delta p$, jossa p on staattinen paine kohdissa 1 ja 2, r on nesteen tai kaasun tiheys, h on poikkileikkauksen korkeus, Δp on painehäviö (kitkahäviö) ja v nopeus poikkileikkauksessa. Oletetaan, että korkeusero on pieni tai sitä ei ole ja painehäviötä ei synny. Lisäksi oletetaan, että nopeus v_1 on nopeuteen $v_2$verrattuna huomattavan pieni, jolloin voidaan merkitä v_1=0. Paine-ero merkitään dp= p_2-p_1. Tämän perusteella saadaan $v_2 = \sqrt{\frac{2dp}{r}}$ ja virtaukselle saadaan paine-eron perusteella mitattuna yhtälö 5.2.



Kuva 5.1: Virtaus aukosta

$$q_v = \mu A \sqrt{\frac{2dp}{r}} \tag{5.2}$$

μ	Purkauskerroin, normaalisti 0,5 - 1,0
A	Aukon pinta-ala
dp	Paine-ero
r	Tiheys

Usea tilavuusvirtaus perustuu virtauksessa tapahtuvaan paine-eron mittaukseen. Yhtälö pätee myös kasvinsuojeluruiskun tai öljypolttimen suuttimen toimintaan. Muuttamalla painetta voidaan muuttaa ruiskutusta tai öljyvirtauksen määrää. Hydrauliventtiileissä voidaan virtausaukkoa muuttamalla säätää virtausmäärää (liikenopeutta).

Mittaamalla paineet kuvan 5.1 kohdista 1 ja 2 saadaan laskettua virtaus. Mittaustavan ongelmana on, että se aiheuttaa melko suuren vastuksen (painehäviön). Sen takia käytetään muita vähemmän painehäviötä aiheuttavia tapoja.

Esimerkki. *500 m ilmastointiputkeen laitetaan kuristuslaippa, jonka koko on 450 mm. Paine-eron mittauksessa saadaan 205 Pa paine-ero. Mikä on virtausmäärä, kun laipan purkauskerroin on 1 ja ilman tiheys on 1,2 kg/m^3 ?*
$A = \frac{\pi \cdot 0{,}5^2}{4} = 0{,}159$ m^2, $q_v = 0,159\sqrt{\frac{2 \cdot 205}{1{,}2}} = 2{,}94$ m^3/s $= 10580$ m^3/h.

Putkivirtauksessa on kolme erilaista painetta, staattinen paine (static pressure), dynaaminen paine (patopaine, dynamic pressure) ja kokonaispaine (stagnation pressure), kuva 5.2 ja yhtälö 5.3.

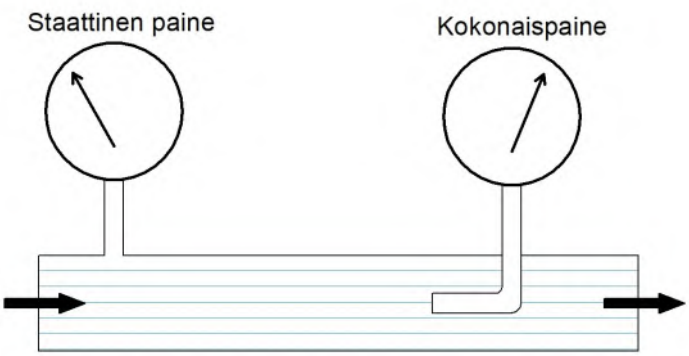
$$p_{kok} = p_{st} + p_{dyn} \tag{5.3}$$

Staattinen paine mitataan virtausta vastaan kohtisuoraan ja kokonaispaine virtauksen suuntaan. Dynaaminen paine saadaan näiden kahden erotuksena. Dynaaminen paine syntyy virtauksen nopeudesta yhtälön 5.4 mukaisesti. Tästä yhtälöstä voidaan ratkaista nopeus v eli kahden painemittauksen perusteella voidaan määrittää virtauksen nopeus, yhtälö 5.5.

$$p_{dyn} = \frac{1}{2} r v^2 \tag{5.4}$$

p_{dyn}	Dynaaminen paine
r	Tiheys
v	Nopeus

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot p_{dyn}}{r}} \tag{5.5}$$



Kuva 5.2: Putkivirtauksen paineet

Esimerkki. Ilmavirtauksen kokonaispaine on 120 Pa ja staattinen paine 45 Pa, mikä on virtausnopeus? Käytetään ilmalle tiheyttä 1,2 kg/m^3. Dynaaminen paine eli patopaine on 120-45= 75 Pa. $v = \sqrt{\frac{2 \cdot 75}{1{,}2}} = 11{,}2$ m/s.

5.2 Tilavuusvirtaus

Tilavuusvirtaus (volumetric flow) tarkoittaa aikayksikössä virtaamaa tilavuutta, yhtälö 5.6. Tilavuusvirtauksen perusyksikkö on m^3/s. Tämä on harvoin käyttökelpoinen yksikkö, usein yksikkönä käytetään l/min tai m^3/h. Laskuissa joudutaan tämän takia usein tekemään laatumuunnoksia ilmoitetusta yksiköstä perusyksikköön (m^3/s).

$$q_v = \frac{V}{t} \tag{5.6}$$

q_v	Tilavuusvirtaus
V	Tilavuus
t	Aika

Esimerkki. *Vesipumpun tuotto mitattiin juoksuttamalla vettä 8 l ämpäriin ja mittaamalla siihen kuluva aika. Ämpärin tilavuuden epävarmuudeksi arvioitiin ± 0,5 l ja ajanmittauksen epävarmuudeksi arvioitiin ± 1s. Mitattu aika oli 26 s. Mikä oli pumpun tilavuusvirtaus ja mikä oli mittauksen epävarmuus?*
$q_v = \frac{8l}{26s} = 18{,}5\ l/min$. *Tilavuuden suhteellinen epävarmuus on* $\frac{0{,}5}{8} = 6{,}3\ \%$ *ja ajan* $\frac{1}{26} = 3{,}8\%$. *Yhdistetty epävarmuus on* $\sqrt{0{,}063^2 + 0{,}038^2} = 7{,}4\%$. *Tulos on, kun käytetään kattavuuskerrointa 2:* $18{,}5l/min \pm 2 \cdot 0{,}074 \cdot 18{,}5l/min = 18{,}5 \pm 2{,}7\ l/min$ *[Ahokas]. Suurentamalla astiaa mittausepävarmuutta voitaisiin pienentää.*

Tilavuusvirtaus saadaan myös aineen virtausnopeudesta ja virtauksen poikkipinta-alasta yhtälön 5.7 avulla.

$$q_v = vA \tag{5.7}$$

v	Virtausnopeus
A	Virtauksen poikkipinta-ala

Virtausmittauksissa voidaan joutua asentamaan mitta-anturit olemassa olevaan laitteistoon. Tämä tarkoittaa enemmän tai vähemmän suurempia muutostöitä. Prosessiteollisuudessa mittalaitteet asennetaan laitteiston asennusten yhteydessä ja ne ovat oleellinen osa prosessin ohjausjärjestelmää.

Virtauksen ja paineen avulla voidaan laskea virtauksen teho, yhtälö 5.8. Tämä teho tarkoittaa nimenomaan virtauksen tehoa (voimakkuutta). Virtaus voi myös siirtää lämpöä paikasta toiseen kuten vesi keskuslämmityksessä tai ilma viljankuivurissa.

$$P = q_v \cdot p \tag{5.8}$$

P	Virtauksen teho
q_v	Tilavuusvirtaus
p	Paine

Esimerkki. *Traktorihydrauliikan virtaus on 56 l/min ja paine sylinteriä nostettaessa on 10 MPa. Kuinka suuri on virtauksen teho?*
$P = \frac{56}{1000 \cdot 60} 10 \cdot 10^6 = 9333W = 9{,}3\ kW$
Hydrauliikassa teho perustuu nimenomaan virtaukseen. Hydraulipumppu aikaansaa virtauksen ja toimilaite (sylinteri, moottori) muuttaa virtauksen mekaaniseksi tehoksi.

5.3 Virtauksen normiointi

Nesteen tai kaasun tiheys riippuu lämpötilasta ja paineesta. Kun lämpötila kohoaa, niiden tiheys pienenee eli tilavuus kasvaa. Nesteillä kohtalaiset paineet eivät vielä muuta tiheyttä toisinkuin kaasuilla. Kaasuilla tilavuusvirtaukset normioidaan, koska niillä esimerkiksi lämpötilan vaikutus on huomattava. Yleisesti normiointipaineena käytetään niillä normaalia ilmanpainetta ja lämpötilaa 0 ^oC (273,15 K). Tämä merkitään symbolilla NTP (Normal Temperature and Pressure). Normiointilämpötila voi kuitenkin olla vaihtoehtoisesti 15 ^oC tai 20 ^oC. Paineena voi olla 1 atm = 101 325 Pa tai 100 000 Pa. Normiointi voidaan tehdä yhtälön 5.9 avulla. Paineet ovat absoluuttisia virtauskanavan paineita ja lämpötilat Kelvin asteita.

$$q_{Nv} = q_v \cdot \frac{T_N}{T} \cdot \frac{p}{p_N} \tag{5.9}$$

q_{Nv}	Normioitu tilavuusvirtaus
q_v	Mitattu tilavuusvirtaus
T_N	Normiointilämpötila
T	Mittauslämpötila
p	Mittauspaine
p_N	Normiontipaine

Esimerkki. *Ilmanvaihtomäärä oli mitattaessa 23 000 m^3/h. Lämpötila oli -14 °C, putkistossa oli 30 Pa ylipaine ja ilmanpaine oli 99,3 kPa. Mikä on ilmanvaihtomäärä normiolosuhteissa (0°C ja 1 atm) ?*
Putkiston ylipaine oli 30 Pa, jolloin sen absoluuttinen paine oli 99300 Pa+30 Pa = 99330 Pa. Ylipaineen vaikutus on tässä vähäinen.
$q_{Nv} = 23000\frac{m^3}{h} \cdot \frac{273,15}{(273,15-14)} \cdot \frac{99330Pa}{101325Pa}$ = *23765 m^3/h.*

Normioinnin lisäksi yhtälöä 5.9 voidaan käyttää yleisesti muuntamaan tilavuusvirtaus tilasta toiseen.

5.4 Massavirtaus

Massavirtaus saadaan yhtälön 5.10 mukaisesti mittaamalla aikayksikössä tapahtuva massan muutos. Massavirtaus saadaan myös tilavuusvirrasta (yhtälö 5.7) kertomalla se materiaalin tai fluidin (neste tai kaasu) tiheydellä.

$$q_m = \frac{m}{t} = q_v \cdot r = v \cdot A \cdot r \tag{5.10}$$

q_m	Massavirtaus
m	Massa
t	Aika
r	tiheys

Esimerkki. *Elevaattorin nostoteho määritettiin juoksuttamalla viljaa vaa'an päälle olevaan saaviin. 10 s ajassa saaviin saatiin 140 kg viljaa. Mikä oli elevaattorin nostoteho?*
$q_m = \frac{140kg}{10s}$ = *50,4 t/h*

Esimerkki. *Kuumavesijohtoputken sisähalkaisija on 15 mm, veden lämpötila on 60 °C ja virtausnopeus on 2 m/s. Mikä on tilavuus- ja massavirtaus?*
Putken poikkipinta-ala on $A = \pi\frac{0,015^2}{4}$ = *0,000177m^2. Tilavuusvirtaus yhtälön 5.7 on* $q_v = 2 \cdot 0,000177$ = *0,000353 m^3/s = 21,2 l/min. Veden tiheys riippuu lämpötilasta. 60 °C lämpötilassa tiheys on 0,98324 kg/l,* $q_m = 0,98324 \cdot 21,2$ = *20,9 kg/min.*

Massavirtauksia varten on myös suoraan massavirtausta osoittavia mittareita. Ne perustuvat joko suoraan massavirtauksen mittaamiseen tai sitten mittarissa on tilavuusvirtamittari, joka laskennallisesti muuttaa ulostuloviestin massavirtaukseksi.

5.4.1 Nesteiden massavirtaus

Nesteiden massavirtaus voidaan mitata suoraan tai tilavuusvirtaus muutetaan massavirtaukseksi laskemalla. Laskuja varten tarvitaan nesteen tiheys. Veden tiheys muuttuu lämpötilan muuttuessa kokeellisen yhtälön 5.11 mukaisesti. Siinä lämpötila T on Celsius asteina.

$$r = 1000 \cdot \left(1 - \frac{(T + 288,9414) \cdot (T - 3,9863)^2}{508929,2 \cdot (T + 68,12963)}\right) \tag{5.11}$$

Esimerkki. *Veden tilavuusvirtaus on 6,6 l/min ja lämpötila on 40 ºC. Mikä on massavirtaus?*
Lasketaan veden tiheys 40 ºC lämpötilassa, $r = 1000 \cdot \left(1 - \frac{(40+288,9414)\cdot(40-3,9863)^2}{508929,2\cdot(40+68,12963)}\right)$ = *992,2 kg/m^3 ja massavirtaus on* $q_m = 6,6l/min \cdot 992,2kg/m$ = *6,5 kg/min. Lähes sama tulos olisi saatu käyttämällä veden tiheytenä 1000 kg/m^3.*

Öljyjen tiheys lasketaan yhtälön 5.12 avulla.

Taulukko 5.1: Öljyjen tiheyksiä ja lämpölaajenemiskertoimia

Öljy	Referenssi-lämpötila ºC	Tiheys kg/m^3	Lämpölaajenemis-kerroin α 1/K
Dieselöljy, talvilaatu	15	820 - 830	0,0008 - 0,001
Dieselöljy, kesälaatu	15	835 - 840	0,0008 - 0,001
Bensiini	15	750	0,0008 - 0,001
Voiteluöljyt	15	850 - 950	0,0006 - 0,0007
Rapsi- ja soijaöljy	20	910 - 930	0,0007

$$r = r_{T_0} \cdot [1 - \alpha(T - T_0)] \tag{5.12}$$

r_{T_0}	Tiheys referenssilämpötilassa T_0
α	Tilavuuden lämpölaajenemiskerroin (1/K), öljyillä tyypillisesti (6...10)·10^{-4} 1/K
T	Laskentalämpötila
T_0	Referenssilämpötila

Öljyjen tiheyksiä ja lämpölaajenemiskertoimia on taulukossa 5.1.

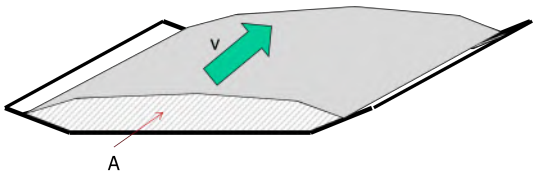
Esimerkki. *Auto kuluttaa 5,5 l sadalla kilometrillä ja keskinopeus on 70 km/h. Polttoaineen on kesälaatuinen dieselöljy. Mikä on polttoaineteho, kun polttoaineen lämpöarvo on 43 MJ/kg ja polttoaineen lämpötila on 25 ºC?*
Lasketaan ensin polttoaineen tilavuusvirtaus. Tunnissa ajetaan 70 km ja kulutus on 5,5 l/100 km. Tunnissa kuluu polttoainetta $q_v = 70\frac{km}{h} \cdot \frac{5{,}5l}{100km}$ *= 3,9 l/h. Lasketaan polttoaineen tiheys lämpötilassa 25 ºC,* $r = 840 \cdot [1 - 0{,}0009(25 - 15)]$ *= 832 kg/m^3. Polttoaineen massavirtaus on* $q_m = 832\frac{kg}{m^3} \cdot 3{,}9\frac{l}{h}$ *= 3,2 kg/h. Polttoaineteho on* $P = H \cdot q_m = 43\frac{MJ}{kg} \cdot 3{,}2\frac{kg}{h}$ *= 38,3 kW. Moottorin hyötysuhteeksi voidaan arvioida 30%, jolloin liikkumiseen tarvitaan* $0{,}3 \cdot 38{,}3$ *= 11,5 kW. Loput 26,8 kW on häviötehoa.*

5.4.2 Kiinteiden aineiden tilavuus- ja massavirtaus

Edellä on käsitelty nesteiden ja kaasujen virtausta. Maatiloilla siirretään muitakin materiaaleja, kuten viljaa, jauhoja ja rehuja. Niiden virtausmäärien mittaus noudattaa samoja periaatteita kuten nesteiden ja kaasujen virtaukset, pitää mitata virtaavan materiaalin poikkipinta-ala ja nopeus.

Hihnakuljetin

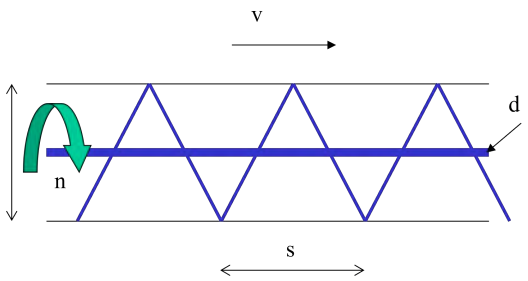
Hihnakuljettimen (belt conveyor) tilavuusvirtaus saadaan laskettu hihnan nopeudesta ja hihnalla olevan materiaalin poikkipinta-alasta yhtälön 5.7 avulla. Poikkipinta-alan määritys tarkkaan on vaikeaa, kuva 5.3, mutta sitä voidaan arvioida kerrospaksuuden ja hihnan leveyden avulla. Massavirtaus saadaan laskettua tilavuusvirrasta yhtälön 5.10 avulla.



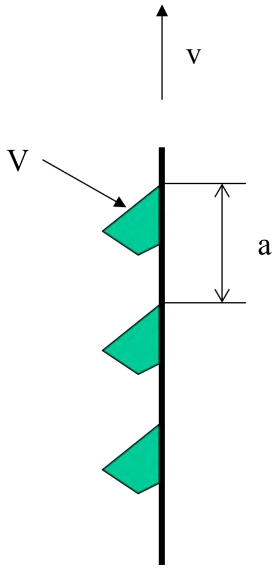
Kuva 5.3: Hihnakuljettimella olevan materiaalin poikkipinta-ala

Esimerkki. *Hihnakuljettimen nopeus on 0,7 m/s, leveys on 55 cm ja viljamassan paksuus on 5 cm. Viljan hehtolitrapaino on 660 kg/m^3. Arvioi kuljettimen massavirtaus.*
Oletetaan, että kuljettimen reunat ovat nostettu 5 cm reunasta vinosti ylöspäin ylöspäin ja vilja on tasaisesti kuljettimen päällä, kuva 5.3. Tehollinen viljamassa leveys on 55 cm - 2·5cm = 45 cm. Lasketaan poikkinpinta-ala suorakaiteen mukaisesti, $A = 0{,}45 \cdot 0{,}05$ *= 0,0025 m^2 ja tilavuusvirtaus on* $q_v = 0{,}0025 \cdot 0{,}7$ *= 0,0158 m^3/s = 57 m^3/h. Massavirtaus on* $q_m = 57 \cdot 660$ *= 37 ton/h.*

Samalla tavalla voidaan laskea heittokuljettimen tai ketjukuljettimen virtaukset.



Kuva 5.4: Ruuvikuljetin



Kuva 5.5: Kuppielevaattori

Ruuvikuljetin

Ruuvikuljettimen (screw conveyor, kuva 5.4) tilavuusvirtaus voidaan laskea sen mitoista ja pyörimisnopeudesta. Siirrettävän massan poikkipinta-ala saadaan putken halkaisijasta D ja ruuvin akselin koosta d, $A = \frac{\pi D^2}{4} - \frac{\pi d^2}{4}$. Siirtonopeus saadaan pyörimisnopeudesta n ja ruuvin noususta s, $v = s \cdot n$. Kuljetin ei kuitenkaan ole täynnä. Tämä otetaan huomioon täyttöasteella k, joka vaakasuorassa on 0,30-0,45 ja jyrkässä kulmassa 0,15-0,25. Kuljettimen tilavuusvirtaus on yhtälön 5.13 mukainen. Massavirtaus saadaan kertomalla tilavuusvirtaus materiaalin tilavuuspainolla.

$$q_v = k \cdot v \cdot A = k \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2) \cdot s \cdot n \tag{5.13}$$

Esimerkki. *Viljansiirtoruuvin akselin halkaisija on 12 mm, putken koko on 75 mm ja ruuvin nousu on 80mm. Pyörimisnopeus on 200 r/min. Mikä on teoreettinen tilavuusvirtaus ja mikä on se on jyrkässä kulmassa?*
Teoreettinen kapasiteetti on $q_v = \frac{\pi}{4} \cdot (0,075^2 - 0,012^2) \cdot 0,08 \cdot 200 =$ *0,0689* $m^3/min =$ *4,1* m^3/h. *Jyrkässä kulmassa täyttöaste on 0,15-0,25. Lasketaan virtaus 0,25 täyttöasteen mukaan,* $q_v = 0,25 \cdot 4,1 =$ *1,0* m^3/h.

Elevaattori

Kuppielevaattorissa virtauksen poikkipinta-ala saadaan kupin koosta V, kuppivälistä a ja kupin täyttöasteesta k, kuva 5.5. Poikkipinta-ala on $A = k \cdot \frac{V}{a}$ ja täyttöaste k on viljoilla 0,75 - 0,90 sekä jauhoilla 0,8 - 1,0. Nostohihnan nopeus v on normaalisti 0,8 - 3 m/s. Tilavuusvirtaus voidaan laskea yhtälön 5.14 avulla. Massavirtaus saadaan kertomalla tilavuusvirtaus materiaalin tilavuuspainolla.

$$q_v = k \cdot \frac{V}{a} \cdot v \tag{5.14}$$

Esimerkki. *Elevaattorikupin tilavuus on 5 dl ja kuppiväli on 30 cm. Hihnan nopeus on 2 m/s. Mikä on elevaattorin massavirta vehnää siirrettäessä.*
Käytetään laskuissa täyttöastetta 0,9 ja hehtolitrapainoa 800 kg/m^3. $q_v = 0,9 \cdot \frac{0,5l}{0,3m} \cdot 2m/s$ *= 3,0 l/s = 10,8 m^3/h.*
Massavirtaus on $q_m = 10,8 \cdot 800$ *=8640 kg/h.*

5.5 Tilavuusvirtausmittarit

Yleisimpiä tilavuusvirtamittareita on esitetty taulukossa 5.2. Useimmat mittaustavat perustuvat painemittauksiin ja tarkemmin virtauksen aiheuttamaan paine-eroon ennen ja jälkeen mittalaitteen.

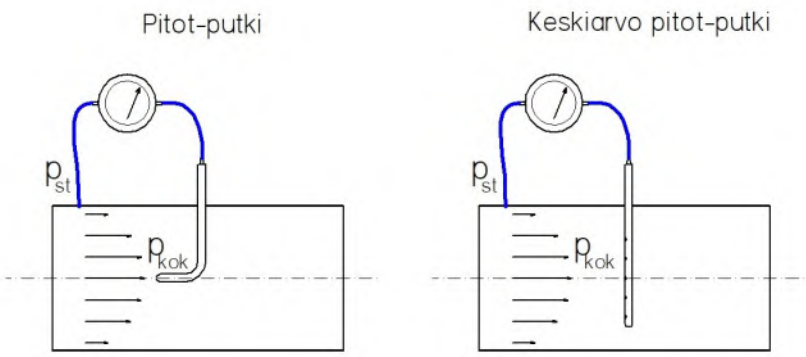
Taulukko 5.2: Tyypillisiä tilavuusvirtauksien mittalaitteita

Mittalaite	Soveltuvuus	Mittaus
Pitot-putki	Kaasu, neste	Paine-ero
Kuristuslaippa	Kaasu, neste	Paine-ero
Venturi	Kaasu, neste	Paine-ero
Rotametri	Kaasu, neste	Lukema
Kuumalanka, -kalvo tai -palloanemometri	Kaasu, neste	Sähköinen
Turbiinimittari	Kaasu, neste	Laskija
Tilavuuslaskija	Neste	Laskija
Magneettiset mittarit	Neste	Sähköinen

5.5.1 Pitot-putki

Kappaleessa 5.1 käsiteltiin putkivirtauksen paineita. Pitot-putki (pitot tube, pitot probe) perustuu virtauksen kokonaispaineen ja staattisen paineen määrittämiseen ja sen avulla voidaan laskea virtausnopeudet, kuva 5.6. Virtauksen vastaan oleva aukko mittaa virtauksen kokonaispaineen ja virtausputken kyljessä oleva aukko putken staattisen paineen. Virtauksen aikaansaama dynaaminen paine saadaan vähentämämällä kokonaispaineesta staattinen paine, yhtälöt 5.3 ja 5.4. Ratkaistaan yhtälöstä 5.4 nopeus v, yhtälö 5.15.

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot p_{dyn}}{r}} \tag{5.15}$$



Kuva 5.6: Pitot putkien periaatteet, vasemmalla perinteinen pitot-putki, oikealla keskiarvopitotputki

Esimerkki. *Pitot-putki mittauksessa saatiin kokonaispaineeksi* p_{kok}*= 120 Pa ja staattinen paine* p_{st}*= 50 Pa. Mikä on virtausnopeus, kun putkessa on ilmaa. Ilman tiheytenä voi käyttää likiarvoa 1,2 kg/m^3.*
Dynaaminen paine p_{dyn}*=120 - 50 = 70 Pa,* $v = \sqrt{\frac{2 \cdot 70}{1,2}}$ *= 10,8 m/s.*

Virtausnopeus putken eri kohdissa on erilainen, suurimmillaan nopeus on putken keskellä ja pienemmillään putken sisäreunalla. Lisäksi virtauksen muoto laminaarinen tai turbulenttinen vaikuttavat nopeusprofiiliin. Tämän takia mittaus pitää tehdä poikkipinta-alalta useasta pisteestä, jotta saadaan virtausnopeuden keskiarvo. Kuvassa 3.18 on esimerkki kahdeksasta mittapisteestä. Mittauspisteet voidaan määrittää taulukon 5.3 mukaisesti. Mittaukset pitäisi tehdä normaalisti kolmelta tasavälien olevalta halkaisijalta tai jos se ei ole mahdollista kahdelta toisiaan vastaan kohtisuoralta halkaisijalta käyttäen kymmentä mittapistettä. Tasaisessa virtauksessa voidaan käyttää kuutta mittapistettä. Jos virtaus on epätasaista, on käytettävä kahdeksaa tai kymmentä mittapistettä.

Taulukko 5.3: Virtausnopeuksien mittauspisteiden suhteellinen etäisyys putken seinämästä halkaisijan suhteen

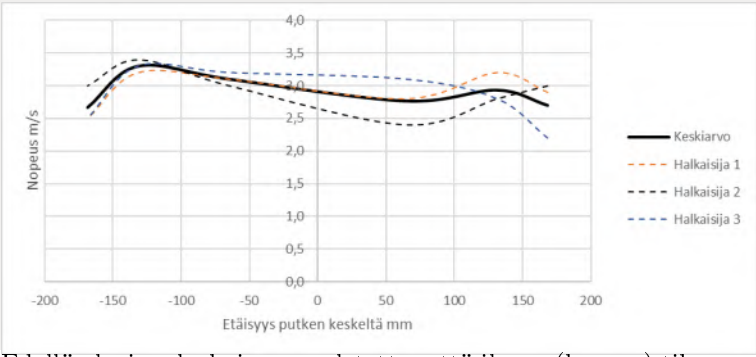
Mittapisteitä	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}
6	0,032	0,135	0,321	0,679	0,865	0,968				
8	0,021	0,117	0,184	0,345	0,655	0,816	0,883	0,979		
10	0,019	0,077	0,153	0,217	0,361	0,639	0,783	0,847	0,923	0,981

Pitot-putken mittauksia varten löytyy sekä oppaita että standardeja, esim. [ISO 3966, ISO 7194]. Oppaita ja mittalaitteita löydät netistä hakusanalla pitot-putki.

Esimerkki. *Ilmamäärä mitattiin 360 mm ilmastointiputkesta kolmesta eri halkaisijasta ja kuudesta eri pisteestä. Staattinen paine oli 65 Pa ja kokonaispaine oli taulukon mukainen. Laske ilmamäärä, kun ilman tiheytenä käytetään 1,2 kg/m^3.*

Etäisyys mm	*Halkaisija 1 Pa*	*Halkaisija 2 Pa*	*Halkaisija 3 Pa*
12	*70*	*70*	*68*
49	*71*	*70*	*70*
116	*70*	*68*	*71*
244	*71*	*70*	*71*
311	*71*	*72*	*72*
348	*69*	*70*	*69*

Lasketaan esimerkiksi yhden mittapisteen nopeus. Otetaan halkaisijan 1 ja 244 mm mittapiste. Kokonaispaine on siinä 71 Pa, jolloin dynaaminen paine on 71 - 65 = 6 Pa. Nopeus on $v = \sqrt{\frac{2 \cdot 6}{1,2}} = 3,2$ *m/s. Kun lasketaan kaikkien mittapisteiden keskiarvo, saadaan nopeuden keskiarvoksi 2,9 m/s. Poikkipinta-ala on* $\frac{\pi \cdot 0,36^2}{4} = 0,10$ *m^2 ja virtausmäärä on* $q_v = v \cdot A = 2,9 \cdot 0,10 = 0,29$ *m^3/s = 1044 m^3/s. Nopeusprofiili on kuvan mukainen. Siitä voidaan päätellä, että virtaus on turbulenttinen, laminaarisen virtauksen profiili olisi parabolinen.*

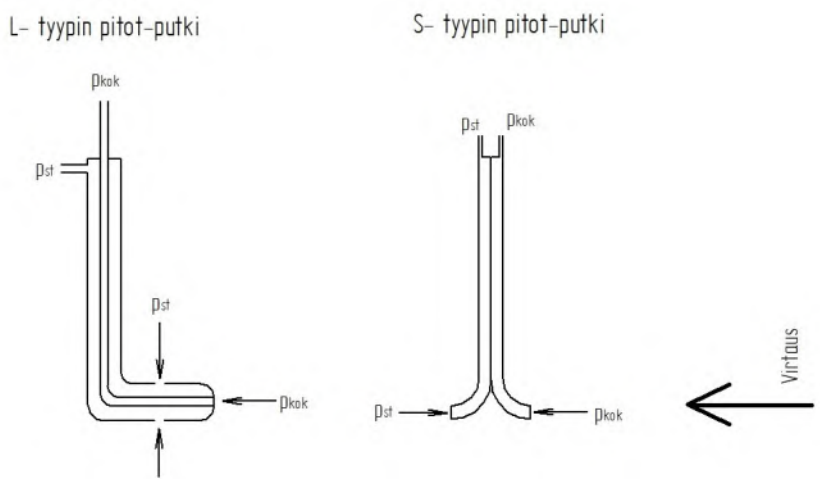


Edellä olevissa laskuissa on oletettu, että ilman (kaasun) tiheys on tietty. Näin ei kuitenkaan ole, vaan paine ja lämpötila vaikuttavat tiheyteen. Tarkemmissa laskuissa pitää ottaa huomioon lämpötila ja paine. Ilman tiheys riippuu voimakkaasti lämpötilasta, jolloin tilavuusvirtaus voidaan joutua vielä normioimaan tiettyyn lämpötilaan (normaalisti 0, 15 tai 20 °C).

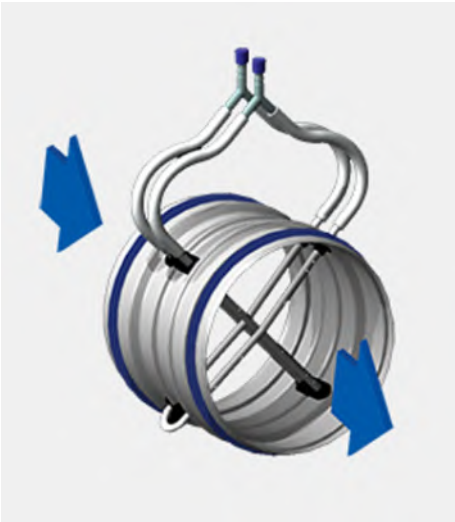
Mittaukset pitää tehdä häiriintymättömästä virtauksesta, mikä tarkoittaa sitä, että ennen ja jälkeen mittauksen on oltava suorat putkiosuudet. Tyypillisesti ennen mittausta suoran putken osuus on vähintään viisi kertaa putken halkaisija ja sen jälkeen kaksi kertaa halkaisija.

Pitot-putkien perustyyppejä ovat yksinkertaisen putken lisäksi L ja S-tyypin putket, kuva 5.7. Ne mittaavat samanaikaisesti sekä kokonaispaineen että staattisen paineen. Kun nämä yhdistetään painemittauksen vastapuolille, saadaan suoraan dynaaminen paine.

Kuvassa 5.6 on esitetty myös keskiarvo pitot-putki (averaging pitot tube). Siinä on useita reikä yhdessä putkessa, jolloin saadaan kertamittauksella kokonaispaine ja anturi voi olla kiinteästi asennettuna putkistoon. Kuvassa 5.8 on esimerkki tällä periaatteella toteutetusta ilmavirran mittalaitteesta.



Kuva 5.7: L- ja S-tyypin pitot-putki



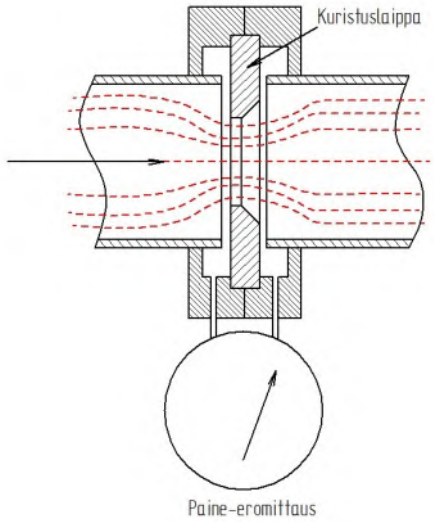
Kuva 5.8: Ilmavirran mittaus putkistoon asennetun Halton mittasiivikon avulla, https://www.halton.com/wp-json/halton/print/31910/pdf

Pitot-putkien hyvänä puolena on, etteivät ne aiheuta virtaukseen vastapaineita. Useat muut mittarit aiheuttavat vastapaineen (painehäviön). Valmistajasta riippuen pitot putkien käytössä voi olla laskentayhtälöissä erilaisia laitekohtaisia kertoimia. Nämä löytyvät laitteiden käyttöohjeista.

Pitot putkia voit nähdä lentokoneiden keulalla. Niiden nopeudet mitataan yleensä pitot putkella. Kyseessä on L-tyypin putki, josta saadaan suoraan dynaaminen paine ja siitä nopeus.

5.5.2 Kuristuslaippa

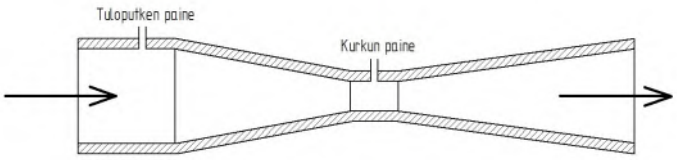
Kuvan 5.1 periaatteella voidaan tehdä virtauksen mittalaite (kuristuslaippa, orifice plate), kuva 5.9. Näitä on saatavissa joko kaupallisesti valmistettuna tai ne voidaan valmistaa ISO-5167 strandardisarjan [ISO 5167] mukaisesti. Kuristuslaipat asennetaan kiinteästi putkistoon ja niiden mittaustarkkuus on hyvä, mittausvirhe on $\pm 0,5$- 1 %.



Kuva 5.9: Kuristuslaippa

5.5.3 Venturiputki

Venturiputkessa (venturitube) on suppeneva ja laajeneva kartio kuvan 5.10 mukaisesti. Kuristus aiheuttaa virtausnopeuden lisääntymisen ja staattisen paineen alenemisen. Mittaamalla tulopaine ja kurkun paine voidaan laskea virtausnopeus. Venturiputket on määritelty ISO-5167 [ISO 5167] standardisarjassa. Venturiputki aiheuttaa pienemmän painehäviön kuin kuristuslaippa ja siihen kerääntyy vähemmän likaa kuin kuristuslaippaan. Mittausvirhe on luokkaa $\pm 1\%$.



Kuva 5.10: Venturiputki

5.5.4 Rotametri

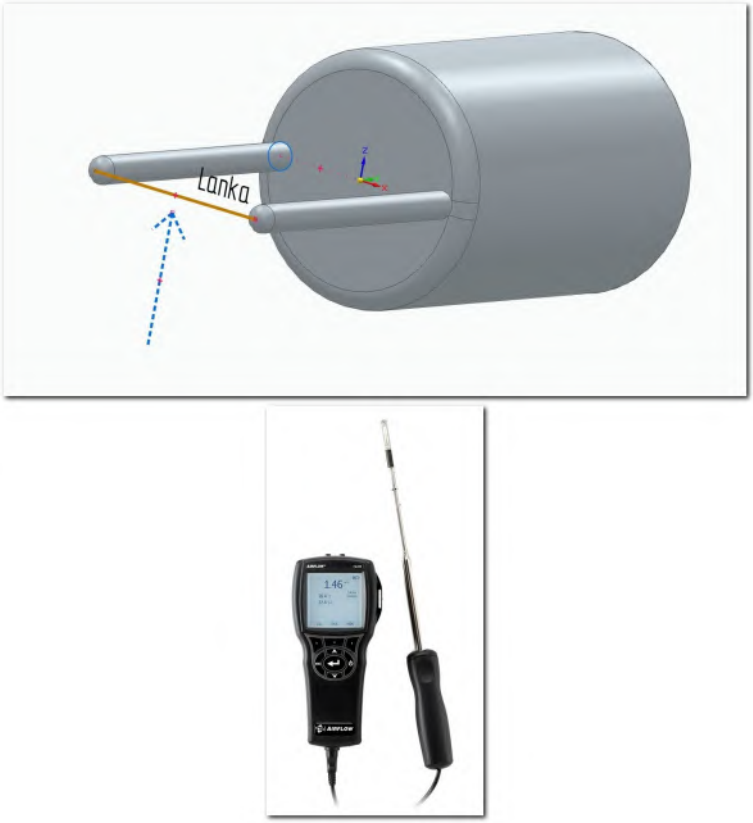
Rotametrissa (muuttuva-aukkoiset mittarit, rotameter) on läpinäkyvässä ja laajenevassa putkessa oleva kelluke. Virtaus nostaa kelluketta ylöspäin ja putkessa olevasta asteikosta voidaan lukean virtausmäärä, kuva 5.11. Rotametrit ovat yksinkertaisia ja halpoja. Useimmiten ne on tarkoitettu virtauksen suoraan lukemiseen, mutta niistä on myös mahdollista saada sähköinen viesti.

Kuva 5.11: Rotametri

5.5.5 Kuumalanka, -kalvo tai -palloanemometri

Anemometrillä tarkoitetaan yleisesti tuulen tai virtauksen mittaamiseen tehtyä laitetta. Kuumalanka- (hot wire anemometer), kuumakalvo (hot film anomometer) ja kuumapalloanomometri perustuvat siihen, että lämmitetty lanka tai kalvo on virtauksessa, joka jäähdyttää lämmitettyä elementtiä. Laite voi pyrkiä pitämään virran, jännitteen tai lämpötilan vakiona. Sen perusteella voidaan määrittää virtaus. Langat tai kalvot ovat ohuita ja siten ne reagoivat nopeasti muutoksiin. Kuumalanka-anomometri mittaa yhden suuntaista virtausta ja mittaussuunta on helppo vaihtaa. Kuumakalvoanemometri voidaan tehdä pitkulaisena tai se voidaan muotoilla kärjeksi tai palloksi. Muodosta riippuen se voi mitata yhdestä suunnasta tai se mittaa koko virtausta.

Kuvassa 5.12 on kuumalanka-anemometrin periaatekuva. Lankaosa on käytännössä suojattu ympärillä olevalla suojaputkella. Kuumakalvoanomometrissä on langan sijasta keraaminen puikko, jonka ulkopinta on vuorattu sähköä johtavalla kalvolla. Lankamaisen muodon lisäksi mittapää voi olla meisselin, kartion, pallon tai tason muotoinen. Lisäksi on saatavissa kahdesta tai kolmesta suunnasta saman aikaisesti mittaavia antureita tai kuumapalloantureita, jotka mittaavat kokonaisvirtausta ilman suuntatietoa.

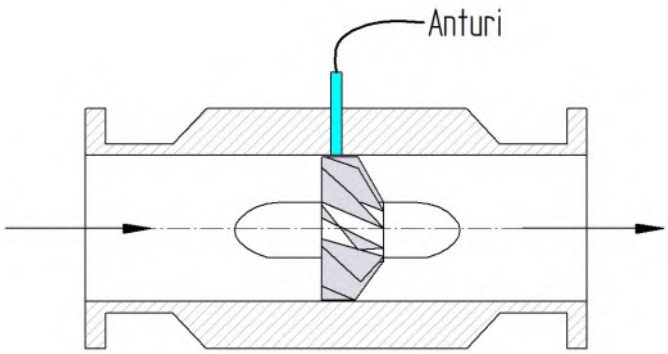


Kuva 5.12: Kuumalanka-anemometrin mittapään periaate ja TSI anemometri

Kuumalanka- ja kuumakalvoanemometrit ovat monipuolisia mittalaitteita ja ne ovat pienikokoisia ja helposti liikuteltavia. Lisäksi ne soveltuvat sekä kaasujen että nesteiden virtausmittauksiin.

5.5.6 Turbiinimittari

Turbiinimittarit (turbine flow meter) perustuvat virtauksessa pyörivään siivikkoon. Kuvassa 5.13 on esitetty turbiinimittarin periaate, virtaus saa turbiinin pyörimään ja usein niissä on pulssianturi, joka tunnistaa turbiinisiiven ja antaa pulssin siiven ohittaessa anturin. Turbiinimittari soveltuu sekä nesteiden että kaasujen mittaamiseen. Mittarit voivat olla kiinteästi putkistoon asennettavia tai esimerkiksi kädessä pidettävä ilmannopeusmittareita.



Kuva 5.13: Turbiinimittarin periaate

5.5.7 Tilavuuslaskija

Tilavuuslaskijan (positive displacement meter) yleisin tyyppi on soikioratasmittari, kuva 5.14. Siinä on elliptiset hammasrattaat, joita virtaava neste pyörittää. Näitä mittareita käytetään usein öljyn ja polttoaineiden mittaamiseen. Mittari antaa kerran kierroksella pulssin, jonka laskijalaite rekisteröi. Yksi pulssi vastaa tiettyä tilavuutta.

Kuva 5.14: Kytola soikioratasmittari, https://kytola.com/fi/tuotteet/soikioratasmittarit/

5.5.8 Muita tilavuusmittareita

Edellä esitettyjen lisäksi virtauksen mittaukseen on saatavissa esimerkiksi magneettisia mittareita (magnetic flow meter), coriolis mittareita (coriolis flow meter) ja ultraäänimittareita (ultrasonic flow meter). Näistä coriolismittari on massavirtamittari.

Luku 6

Melun mittaaminen

Melu aiheuttaa eläimille ja ihmisille stressiä ja kuulovaurioita. Melun mittaamisessa pitää noudattaa olemassa olevia mittausstandardeja, muutoin ei saada vertailukelpoisia tuloksia. Mittaustulos riippuu mikrofonin sijoituksesta ja etäisyydestä melulähteestä. Kun etäisyys melulähteeseen kaksinkertaistuu, melu vähenee 6 dB. Työsuojelumittauksissa se sijoitetaan ihmisen korvan läheisyyteen. Ympäristömelun mittauksissa on määrätyt menetelmät ja sijoituspaikat.

Ääni on paineaaltoja, jotka korva aistii. Perustana on äänen aiheuttama paine. Ihmisen kuulokynnyksenä käytetään 20 µPa (0,00002 Pa) painetta. Tämä vastaa 1 pW tehoa. Korva on herkkä hyvin pienien paineiden muutoksilla. Eläimillä kuulo voi olla ihmistä tarkempi eli ne pystyvät aistimaan vielä heikompia ääniä. Ongelmana on, että aiemmin puuttui kokonaan voimakkaat äänet, jolloin korvaan ei ole kehtittynyt sitä vastaan suojakeinoa, vaan se voi vaurioitua voimakkaista äänistä.

Korva on herkkä instrumentti ja kuulokynneksen ja raastavan melun paine-ero on miljoonan luokkaa.Äänen voimakkuuden tehoa verrataan kuulokynnykseen ja ilmoitetaan desibeleinä, yhtälö 6.1. Aiemmin käytettiin pelkkää beliä (B), josta puuttui yhtälön kerroin 10. Myöhemmin katsottiin järkeväksi desibelin käyttö. Äänen teho on verrannollinen paineen toiseen potenssiin. Siitä tulee kerroin 2 ja 2·10 =20, joka on yhtälössä 6.1. Äänenpainetasoa (SPL = Sound Pressure Level) merkitään symboolilla L_p.

$$L_p = 10 \cdot log\frac{P}{P_0} = 20 \cdot log\frac{p}{p_0} \tag{6.1}$$

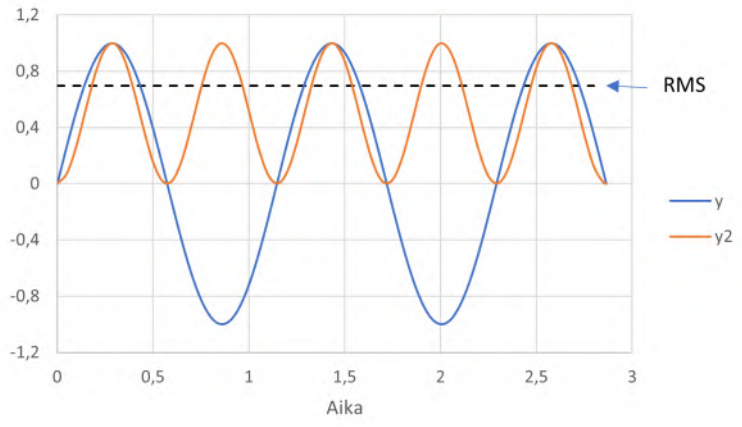
L_p	Äänenpainetaso db
P	Ääniteho
P_0	Kuulokynnyksen ääniteho, 1 pW
p	Äänenpaine
p_0	Kuulokynnyksen äänenpaine, 20 µPa

Kyseessä on siten logaritminen asteikko ja esimerkiksi äänitehon kaksinkertaistuessa ($10 \cdot log2$=3) desibeliarvo nousee 3 dB. Ihmisen korva aistii melun muutoksen erilailla, 2-3 dB muutoksen se juuri havaitsee ja 10 dB muutoksen se aistii melun kaksinkertaistumisena tai puolittumisena. Äänenpainetasoja ei voida laskea suoraan yhteen, vaan on laskettava joko äänteho tai äänenpaine, jotka voidaan summata. Tätä verrataan sitten kuulokynnykseen. Ääniteho saadaan ratkaisemalla yhtälöstä 6.1 P, yhtälö 6.2.

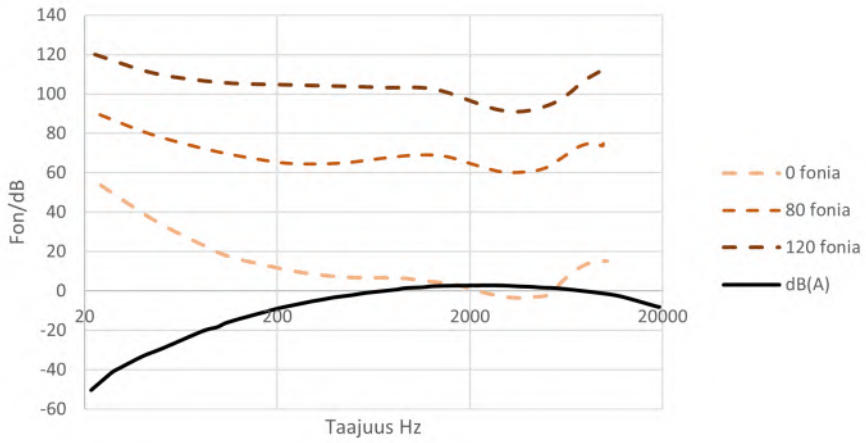
$$P = P_0 \cdot 10^{L_p/10} \tag{6.2}$$

Esimerkki. *Kaiutin aiheuttaa kuuntelupaikalla 70 dB äänenvoimakkuuden. Mikä on äänenvoimakkuus, jos kaiuttimia on kaksi (stereot)?*
Desibelejä ei voida laskea suoraan yhteen, vaan pitää laskea niiden äänitehot, jotka summataan, jonka jälkeen voidaan laskea yhteinen dB arvo.Yhden kaiuttimen ääniteho on yhtälön 6.2mukaan, $P = 1pW \cdot 10^{70/10}$ *= 10000000 pW. Kun kaiuttimia on kaksi, ääniteho on 2·10000000 =20000000 pW ja äänenpainetaso on* $L_p = 10 \cdot log\frac{20000000}{1} =$ *73 dB. Äänitehon kaksinkertaistuminen lisää äänenpainetasoa 3 dB. Korva pystyy tämän juuri huomaamaan tason muutoksena.*

Jos äänisignaalia tarkastellaan sellaisenaan, niin se värähtelee nollan kahtapuolen ja sen keskiarvo on lähellä nollaa. Signaalin keskiarvo ei siten kuvaa äänen voimakkuutta. Tämän takia ääntä mitataan tehollisarvona (Root Mean Square = RMS, $x_{RMS} = \sqrt{\frac{\Sigma x^2}{n}}$). Signaali neliöidään ja summataan. Neliösummasta lasketaan keskiarvo, josta otetaan neliöjuuri, kuva 6.1. Samalla lailla vaihtosähkö mitataan yleismittarilla, joka antaa suoraan tehollisarvon. Se kuvaa nimensä mukaisesti signaalin tehoa.



Kuva 6.1: Esimerkki sinimuotoisen äänen tehollisarvosta. y=alkuperäinen signaali, y2=signaalin neliö,RMS=tehollisarvo



Kuva 6.2: Ihmiskorvan äännekkyystasot ja mittauksen A suodatus

Ihmiskorva kuulee eritaajuiset äänet erilailla. Kuvassa 6.2 on esitetty miten ihmiskorva kuulee eritaajuisia ääniä. 0 fonin äännekkyystaso tarkoittaa korvan kuulokynnystä. Äännekkystasossa korva kuulee eri taajuiset äänet saman suuruisina. Korva kuulee parhaiten 2000 - 5000 Hz ääniä. Matalien ja korkeiden äänien kuulemiseen tarvitaan selvästi suurempi voimakkuus. Melumittauksessa käytetään yleisesti A-suodatusta, joka kuvaa korvan keskivoimakkaiden äänien kuulemista. Kuvaan 6.2 on piirretty dB(A) suodatuskäyrä, melumittari painottaa tämän mukaisesti mittausta, matalia ja korkeita taajuuksia vaimennetaan ja korvan herkintä taajuusaluetta vahvistetaan hieman. Voit kokeilla eri taajuuksisia äänitä netistä löytyvien äänigeneraattoreiden (esim https://www.szynalski.com/tone-generator/) avulla. Kuuntelu vaatii tietysti kunnollisen äänentoiston.

A-suodatuksen lisäksi melumittauksissa käytetään B-, C-, D- ja Z-suodatusta. Niiden käyttö on kuitenkin harvinaista. Z-suodatus ei oikeastaan ole suodatus, vaan mittaus on lineaarinen eli ilman mitään suodatusta. Melu mitataan 20 Hz - 20 000 Hz alueelta. Jos halutaan selvittää tarkemmin melunlähdettä, silloin tehdään taajuusanalyysi. Tämä voi olla oktaavi-, terssi- tai kapeakaistainen FFT-analyysi. Kännyköihin on saatavissa melumittari aplikaatioita, kuva 6.3. Nämä antavat karkean kuvan melusta, virallisissa mittauksissa tarvitaan aina tietyn tarkkuusluokan mittalaitteet ja niille kalibraattorit.

Melun mittaukseen liittyy runsaasti erilaisia termejä, joilla tarkoitetaan tietyllä tavalla mitattua ja laskettua melua.

- **dB(A), dB(C), dB(D), dB(Z)**, mittaamisessa on käytetty jotain näistä suodattimista
- $\mathbf{L_{Aeq}}$, mittausjakson äänitasojen tehollinen keskiarvo kun käytetään A-suodatusta
- $\mathbf{L_{w(A)}}$ tai $\mathbf{L_{wA}}$, äänitehotaso, laitteen aiheuttama melupäästö
- $\mathbf{L_{DEN}}$, vuorokauden äänitaso, jossa ilta-ajan (E) klo 19-22 keskiäänitasoa painotetaan + 5 dB ja yö-aikaa (N) +10 dB, melun häiritsevyyden kuvaamiseksi.

Kuva 6.3: Decibel X kännykkäsovellus

- $\mathbf{L_{max}}$, mittausjakson aikana korkein mitattu äänitaso, ympäristömelussa L_{AFmax}
- $\mathbf{L_{AImax}}$, ampumaratojen melu
- $\mathbf{L_{Aeq,\,t}}$, tietyn ajanjakson t keskiäänitaso
- $\mathbf{L_{(Aeq),d}}$, päiväajan (klo 7-22) keskiäänitaso
- $\mathbf{L_{(Aeq),yö}}$, yöajan (klo 22-7) keskiäänitaso

Koska melu vaihtelee työpaikoilla päivän aikana, mittaus tehdään annosmeluna (dosimeter). Sinä otetaan huomioon kunkin melutason kestoaika ja niistä lasketaan logaritmisesti keskiarvo. Annosmelumittari rekisteröi suoraan meluannosta. Työsuojelulainsäädännössä päivittäisen melualtistuksen alempi toiminta-arvo on 80 dB(A) ja ylempi 85 dB(A). Päivittäisen meluannoksen raja-arvo on 87 dB(A) [VNa 85/2006]. Alemman toiminta-arvon ylittyessa työntekijällä on oikeus kuulonsuojaimiin ja kuulotarkastuksiin. Ylemmän toiminta-arvon ylittyessä tarvitaan meluntorjuntaohjelma ja työntekijä velvoitetaan kuulonsuojainten käyttöön.

Valtioneuvosto on antanut päätöksen melutason ohjearvoista [VPN 993/1992]. Sen mukaan asumisalueilla ulkomelu saa olla päivällä korkeintaan 55 dB(A) ja yöllä 50 dB(A). Sisällä asuintiloissa melu saa olla korkeintaan 35 dB(A) päivällä ja 30 dB(A) yöllä. Maa- ja metsätalousministeriön suositusten mukaisesti [MMM-RMO C2.2] ilmanvaihdon melurajana on 65 dB jatkuva melu. Tämä poikkeaa ihmisille annetuista suosituksista siinä, että tekstissä on dB arvo ei dB(A) arvo, jolloin vaatimus on tältä osin ankarampi, koska mittus tehdään lineaarisella asteikolla.

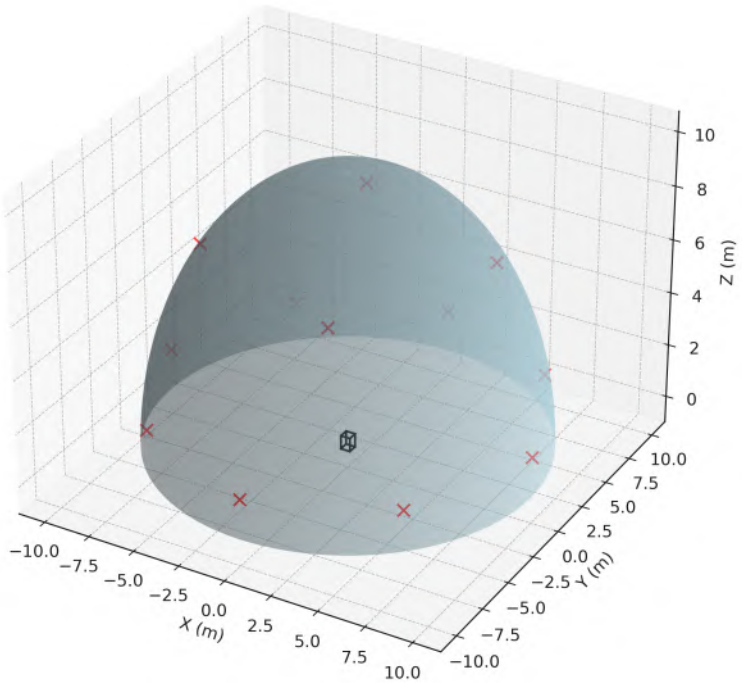
Melumittareilla on omat tarkkuusluokituksensa [IEC 61672-1]. Tarkkuusluokkia on kaksi, Class 1 ja Class 2. Tarkkuusluokka 1 (Class 1) on tarkoitettu tieteellisiin mittauksiin, viranomaiskäyttöön ja ympäristömelun mittaamiseen. Tarkkuusluokka 2 (Class 2) on tarkoitettu työpaikkamelumittauksiin ja kenttäkäyttöön. Halpoja melumittareita on myös runsaasti tarjolla, niillä ei useinkaan ole mitään luokitusta. Tarkkuusluokitelluissa melumittareissa on vaihdettavat mikrofonit ja kalibrointi tehdään Pistonphone kalibraattorilla, joka antaa 94 dB tai 114 dB vakioäänenpaineen ja taajuutena on 250 tai 1000 Hz. Kalibraattori ja kalibrointi ovat usein pakollisia tehtäessä standardien mukaisia viranomaisten hyväksymiä mittauksia. Lisäksi voidaan tarvita jäljitys virallisiin mittanormaaleihin.

Jos halutaan tietää melun lähde, silloin tarvitaan joko oktaavi-, terssi- tai kapeakaista-analyysiä. Oktaavien keskitaajuudet ja kunkin oktaavikaista ala- ja ylärajataajuudet on esitetty taulukossa 6.1. Yläraajataajuuden ja alarajataajuuden suhde on kaksi. Terssi- eli 1/3-oktaavianalyysissä kukin oktaavikaista on jaettu vielä kolmeen osaan. Sillä saadaan tarkempi kuva melutaajuuksista. Kapeakaista-anlyyseissä käytetään FFT-laskentaa (Fast Fourier Transform) ja sillä saadaan vielä tarkempi taajuusjako. Oktaavianalyysi on usein liian karkea ja kapeakaista-analyysi voi taasen olla liian kapea, jotta melulähteen taajuus saadaan selville. Terssianalyysi soveltuu usein hyvin melutaajuuden paikallistamiseen. Moottorin äänien taajuudet ovat muutaman sadan hertsin alueella ja voimansiirron ja hydrauliikan tuhansien hertsien alueella.

Taulukko 6.1: Oktaavien keskitaajuudet ja ala- ja ylärajataajuudet

Keskitaajuus Hz	Alarajataajuus Hz	Ylärajataajuus Hz
31,5	22	44
63	44	88
125	88	177
250	177	355
500	355	710
1000	710	1420
2000	1420	2840
4000	2840	5660
8000	5660	11300
16000	11300	22600

Melun mittaaminen riippuu voimakkaasti mm siitä miltä etäisyydeltä mittaus tehdään ja mitkä ovat mittausolosuhteet. Tämän takia mittauksille on olemassa standardoidut mittausmenelmät. Melua voidaan mitata meluannoksena, tämä antaa työntekijän pävittäisen meluannoksen ja sen mukaan voidaan arvioida esimerkiksi melusuojainten tarpeellisuutta. Liikkuvissa työkoneissa ja kädessä pidettävissä työlaitteissa on usein omat turvallisuusvaatimukset ja omat melunmittausmenetelmät. Työkoneille tehdään myös sen aiheuttaman ympäristömelun mittaus. Koneeseen merkitään mitattu ympärisömelun äänitehotaso L_{WA} arvona. Tämä on määritelty konedirektiivissä [2006/42/EY] ja tarkemmin direktiivissä 2000/14/EY [EU 2000/14/EY]. Mittausmenetelmistä ja koneiden meluvaatimuksista on muistettava, että niitä päivitetään jatkuvasti. Kuvassa 6.4 on esimerkki miten mikrofonit äänitehotason mittauksessa voidaan joutua sijoittamaan. Mittauspisteiden meluarvoista lasketaan koneen äänitehotaso.



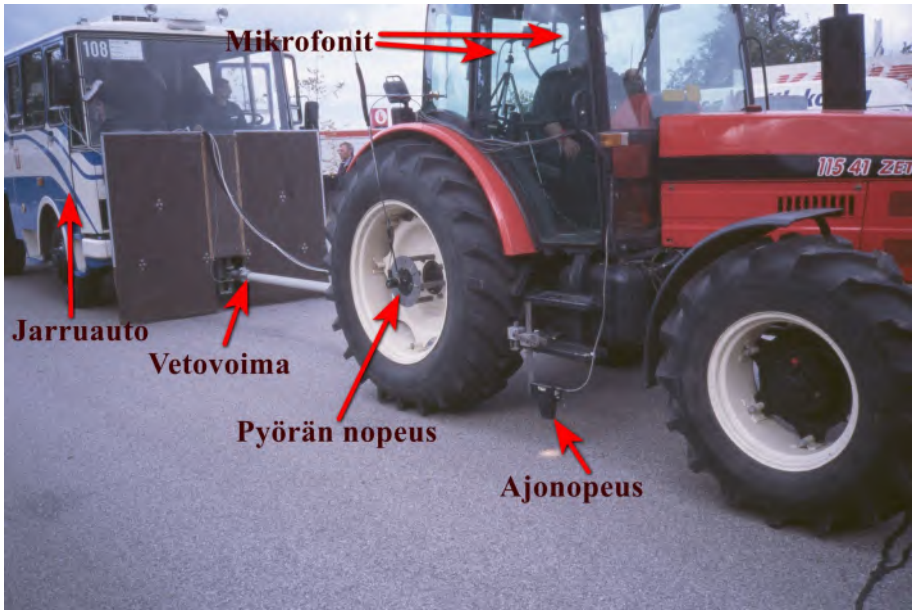
Kuva 6.4: Esimerkki mikrofonien sijoittelusta äänitehotason mittauksessa. Puolipallon säde on 10 m, mitattava kone on origossa ja mikrofonien paikat on merkitty x merkeillä. ChatGPT-generated image, 2025.

Esimerkiksi traktoriohjaamon melun mittauksessa voidaan käyttää seuraavia mittausmenetelmiä:

- EU Directive 2009/76/EC [EU 2009/76/EC]. The driver-perceived noise level of wheeled agricultural or forestry tractors
- OECD Code 5 [OECD Tractor Code 5]. OECD standard code for the official measurement of noise at the driving position(s) on agricultural and forestry tractors

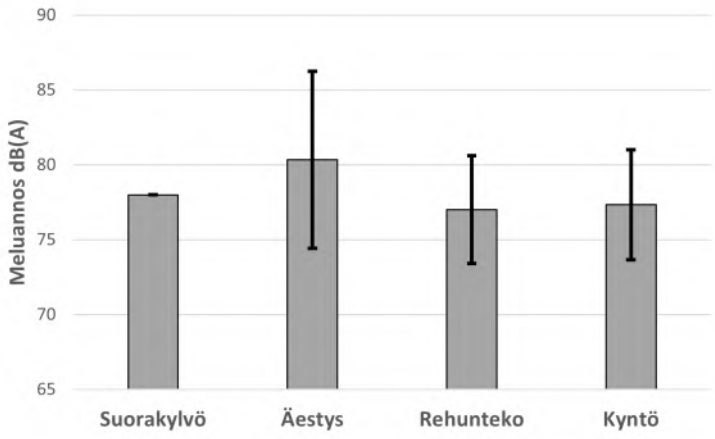
- ISO 7216:2015 [ISO 7216]. Agricultural and forestry tractors — Measurement of noise emitted when in motion.

Tyypillisesti melu mitataan jokaisella ajovaihteella. Traktorin perässä on jarruauto, jonka avulla voidaan kuormittaa traktoria. Kuormitusta lisätään kullakin vaihteella ja etsitään kunkin vaihteen korkein melutaso, kuva 6.5. Traktoridirektiivin mukainen meluraja on 90 dB(A) tai 86 dB(A) riippuen siitä kumpaa direktiivin [EU 2009/76/EC] mukaista mittausmenetelmää käytetään. 90 dB(A) rajaa käytetään kun mittaus tehdään kuormitettuna ja 86 dB(A) rajaa kuormittamattomana suljetussa ja ikkunat ja luukut auki olevassa kokeessa.



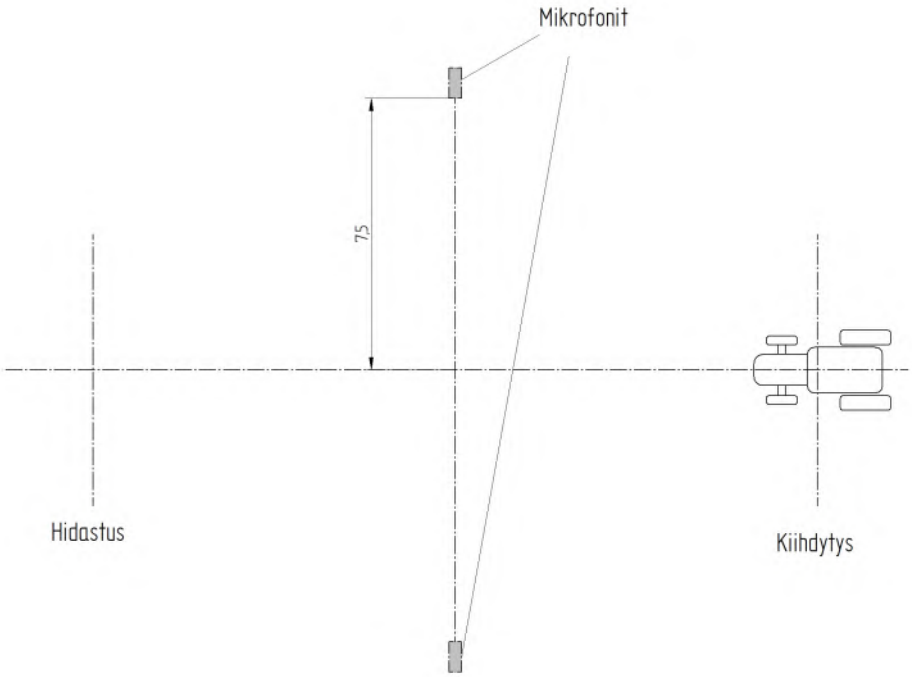
Kuva 6.5: Ohjaamomelun mittaus

Suomessa tehdyssä traktoriohjaamomelun kartoituksessa traktoreita käytettiin erilaisissa maataloustöissä ja niistä mitattiin kuljettajan meluannos [Vähänikkilä ym]. Kuvassa 6.6 on tuloksia tästä kartoituksesta. Mittaukset tehtiin vuosimalliltaan 1982 - 2005 traktoreista. Nykyisiin traktoreihin verrattuna näiden melutasot ovat selvästi korkeampia. Kartoituksessa ongelmatraktoreita olivat ne, joiden ikkunat puuttuivat tai kattoluukku oli auki.



Kuva 6.6: Traktorin ohjaamomelun kartoitus, keskiarvot ja hajonnat

Ohjaamomelun mittaamisen lisäksi ajoneuvoille tehdään ohiajomelunmittaus. Kuvassa6.7 on traktorin ohiajomelun mittaus [EU 2015/96]. Mikrofonit ovat 7,5 m etäisyydellä ajoradan keskeltä. Traktoria ajetaan suurimmalla vaihteella siten, että nopeus on 75% suurimmasta nopeudesta. 10 m ennen mikrofinilinjaa kiihdytetään mahdollisimman nopeasti täyteen nopeuteen (täysi kaasu) ja 10 m linjan jälkeen hidastetaan mahdollisimman nopeasti poistamalla täysi kaasu. Testin aikainen korkein melutaso rekisteröidään. Muilla ajoneuvoilla mittaustapa on samanlainen, kiihdytys- ja hidastuslinjat voivat olla erilaiset, samoin ajonopeus. Standardissa ISO 7216 [ISO 7216] on tarkemmat mittausohjeet.



Kuva 6.7: Traktorin ohiajomelun mittaus

Luku 7

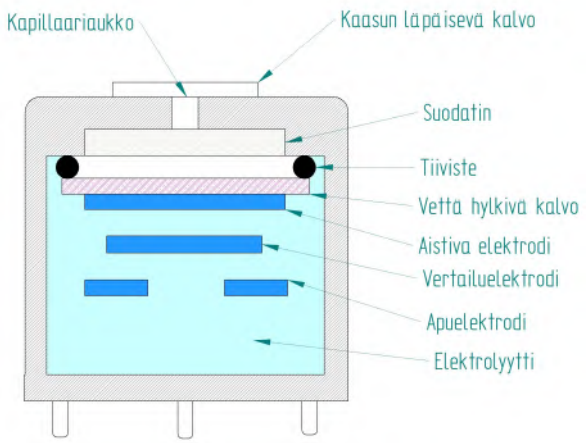
Kaasupitoisuuksien ja päästöjen mittaukset

Kaasupitoisuuksia mitataan karjasuojista ja myös pellon tai metsän maaperän päästöistä ollaan kiinnostuneita. Tässä tutustutaan hieman kaasumittauksiin, jotta ympärtäisimme siinä käytettyä tekniikkaa. Tämä ala kehittyy nopeasti ja uusia menetelmiä tulee lisää jatkuvasti.

7.1 Sähkökemialliset anturit

Sähkökemiallisia antureita käytetään kenttämittauksissa, henkilökohtaisissa kaasuilmaisimissa ja palovaroittimissa. Ne voivat toimia mitattavan tai tarkkailtavan kaasun ja elektrolyysin välisellä reaktiolla, joka tuottaa sähkövirtaa tai kaasu reagoi puolijohdekerroksen kanssa (metallioksidisensori), jolloin vastus muuttuu. Nämä anturit ovat pienikokoisia, kevyitä ja halpoja, mutta ne vanhentuvat ja niissä voi olla muiden kuin mitattavien kaasujen ristivaikutuksia.

Kuvassa 7.1 on esimerkki elektrokemiallisesta anturista. Kaasu virtaa kalvon ja kapillaarisen aukon kautta anturiin. Kaasu vaikuttaa aistivan elektrodin sähköisiin ominaisuuksiin, jonka perusteella kaasupitoisuus voidaan mitata.

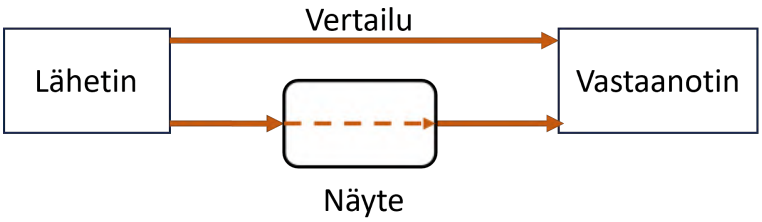


Kuva 7.1: Esimerkki elektrokemiallisesta kaasuanturista

7.2 Infrapuna-analyysi

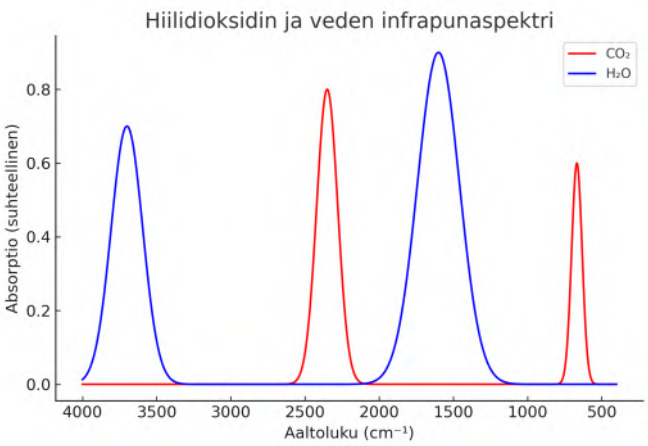
Infrapuna-analyysi tai tarkemmin lähi-infrapuna-analyysi (near infrared NIR) perustuu siihen, että näytteen läpi menevä tai siitä heijastuva infrapunavalo vaimenee näytteessä olevan pitoisuuden mukaisesti. Näytteen läpimenevän mittauksen periaate on kuvan 7.2 mukainen. Lähetin lähettää infrapunavaloa, josta toinen kulkee suoraan vastaanottimeen ja toinen kulkee näytteen läpi. Sen perusteella kuinka paljon valonvoimakkuuksissa on eroa voidaan määrittää näytteen tietyn komponentin pitoisuus.

Aaltoalue on lähi-infrapuna eli sen aallonpituus on 750 nm - 1500 nm. Esimerkiksi veden ja hiilidioksidin spektri on kuvan 7.3 mukainen. Analyyseissä käytetään aallonpituuden sijasta yleisesti aaltolukua. Aallonpituus



Kuva 7.2: Läpimenevän infrapuna-analyysin periaate

λ saadaan yhtälöllä $\lambda = \frac{1}{v}$, jossa v on aaltoluku. Esimerkiksi hiilidioksidi (CO_2) vaimentaa aaltolukuja 2600 ja 700 1/cm (3 850 - 14 300 nm), kuva 7.3 . Eri aineiden spektrit voivat mennä hieman päällekkäin.



Kuva 7.3: Veden ja hiilidioksidin infrapunaspektri

Tietyn pitoisuuden mittaamiseen käytetään vain yhtä tai paria aallonpituutta. Näitä antureita kutsutaan yleisesti NDIR (Nondispersive infrared) antureiksi tai mittalaitteiksi. Jos halutaan mitata useampia aineita yhtäaikaisesti, silloin käytetään FTIR (Fourier Transfer Infrared) analysaattoreita. Ne mittaavat koko spektrin, jolloin saadaan useamman aineen pitoisuudet. Lisäksi laite on tarkempi kuin yhden aaltoalueen laite. Infrapunalaitteiden hintakirjo lähtee muutamasta kymmenestä eurosta. Näitä myydään ilmanlaadun tarkkailuun, jolloin ne mittaavat hiilidioksidia. Kannettavia analysaattoreita voidaan käyttää esimerkiksi maaperän tai karjasuojien päästöjen mittaukseen, kuva 7.4.

Heijastuvaa infrapunatekniikkaa käytetään hyvin monipuolisesti, sillä voidaan mitata esimerkiksi maan, viljan tai hakkeen kosteuksia realiaikaisesti. Lisäksi sillä voidaan määrittää aineiden koostumuksia. Sitä käytetään esimerkiksi rehujen ja lannan jatkuvaan analysointiin, jolloin voidaan mitata esimerkiksi rehun proteiinipitoisuus tai lannan levityksessä ravinteiden määriä. Näillä tekniikoilla on omat nimityksensä, esimerkiksi ATR-FTIR (Attenuated Total Reflectance - FTIR) ja DRIFTS (Diffuse Reflectance Infrared Fourier Transform Spectroscopy).

7.3 Kaasukromatografi

Kaasukromatografi (gas chromatography) on perinteinen laboratorianalysointimenetelmiä. Kaasukromatografia perustuu yhdisteiden erilaisiin liikkumisnopeuksiin lämmitetyn kolonnin läpi kulkiessa, jolloin yhdisteet erottuvat toisistaan. Kolonni on ohut putki, jonka sisällä stationäärifaasi on. Kolonnit ovat pituudeltaan 15-50 m ja sisähalkaisija on 0,1 - 0,5 mm. Eri aineille on saatavissa erilaisia kolonneja. Kaasujen mittauksissa käytetään tässä tekniikassa usein näytteenottoa. Näyte kerätään muoviseen pussiin ja viedään laboratorioon analysoitavaksi. Kaasukromatografista on myös kenttämittauksiin soveltuvia malleja.

Kenttämittauksissa FTIR on yleisesti käytetty, koska analyysi on nopeampi ja mittaus on helpompi ja yksinkertaisempi. Kaasukoromatgrafi soveltuu paremmin laboratorioihin kun tarvitaan tarkkaa analyysiä.

Kuva 7.4: Navetan kaasupitoisuuksien mittaus FTIR analysaattorilla

Luku 8

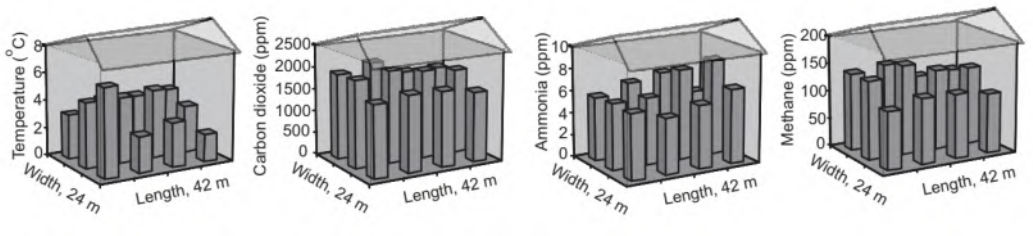
Mittausesimerkkejä

8.1 Karjasuojien olosuhdemittauksia

Karjasuojien olosuhteita mitataan usein kolmen eri tarkoituksen vuoksi. Mittauksilla voidaan seurata eläinten hyvinvointia, voidaan arvoida eläinsuojan päästöjä tai mittauksia käytetään lämpötilan tai ilmanvaihdon säätöön. Mitkään näistä mittauksista eivät ole helppoja, koska rakennukset ovat suuria ja olosuhteet (sää, eläinten aktiivisuus, eläinmäärä) vaihtuvat. Mittaustuloksiin vaikuttaa seuraavat asiat:

- Sää: lämpötila, tuuli, auringonpaiste, ilman kosteus, sade
- Rakennus: kylmä, puolikylmä tai lämmin rakennus, kulkuaukot, ikkunat
- Mittauspaikka rakennuksessa
- Eläin: määrä, aktiivisuus (lypsy, ruokailu, lepo)

Mittaustulokset muuttuvat sen mukaan mistä kohdasta rakennusta mittaus tehdään, kuva 8.1. Aukot, kuten ovet ja ikkunat ja niiden käyttö tuovat vaihtelua mittauksiin, samoin vuorokausirytmit. Navetassa lypsy- ja ruokinta-aika ovat aktiivisia aikoja, kun taasen yö on lepoaikaa. Kun mitataan eläinten hyvinvointia, silloin liikutaan eläinten luona. Kun mitataan ilmanvaihtoa tai päästöjä, silloin käytetään toisenlaista tapaa.



Kuva 8.1: Navetan olosuhteet 2,5 m korkeudella eri kohdista rakennusta [Teye]

Karjasuojien mittausmenetelmiä ja -tuloksia on käsitelty laajasti mm Teyen väitöskirjassa [Teye], Gröhnin pro-gradu tutkielmassa [Gröhn], Ecostal hankkeen loppuraportissa [Kivinen ym] ja Karva hankkeen loppuraportissa [Mannfors B. ja Hautala M.]. Ilmanvaihtojen toimivuudesta ja ilmanvaihdon perusteista on kirjoitettu myös Heimosen työryhmien raporteissa [Heimonen ym 2009, Heimonen ym 2012, Heimonen ym 2014]. Pedersen Tanskasta on ollut eurooppalainen ilmanvaihdon tunnustettu tutkija, hänen kokemuksiaan ja tuloksia löytyy eräänlaisesta karjasuojien ilmastoinnin elämänkertakirjasta [S. Pedersen]. Hassouna ym [Hassouna ym 2020] on tehnyt oppaan, jossa selostetaan karjasuojien päästöjen sekä ilmanvaihdon mittaamista.

8.2 Eläinten hyvinvointi

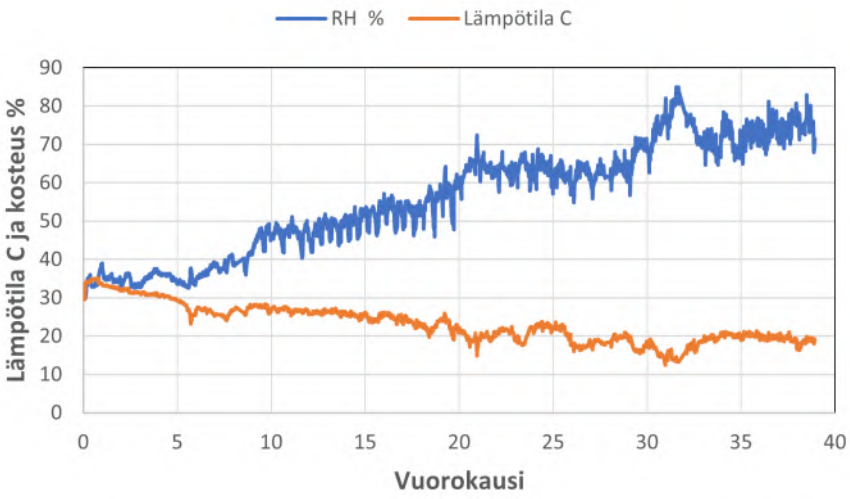
Eläinten hyvinvointi on monitahoinen asia ja siihen liittyy useita säännöksiä. Karjasuojien säännöksiä on saatavissa maa- ja metsätalousministeriön sivustolta [MMM Rakentamissäädökset]. Karjasuojien lämpötilojen, ilmanvaihdon, kosteuden, kaasujen ja melun ohjeellisia suosituksia on annettu maa- ja metsätalousministeriön *Maatalouden tuotantorakennusten lämpöhuolto ja huoneilmasto ohjeessa* [MMM-RMO C2.2]. Taulukossa 8.1 on karjasuojien lämpötilasuosituksia ja myös kriittisiä arvoja, joita ei pitäisi ylittää tai alittaa. Kuumassa eläimille

tulee lämpöstressiä, joka on eläimelle stressaavaa ja voi aiheuttaa lämpöhalvauksen sekä tuotannon alenemista. Kylmässä eläin joutuu käyttämään enemmän energiaa lämmön ylläpitämiseen ja sekin aiheuttaa eläimelle stressiä ja tuotannon alenemista. Kriittisten lämpötila-arvojen sisällä pitäisi pysyä, jotta sekä eläin että tuotanto voisivat hyvin. Eläinroduilla on eroja, esimerkiksi ylämaan karja on sopeutunut hyvin kylmään. Lämpötilasuositus riippuu myös eläimen iästä, aluksi tarvitaan korkeimpia lämpötiloja ja eläimen kasvaessa ne sietävät alempia lämpötiloja. Esimerkiksi broilerin kasvatuksen alkulämpötila on yli 30 °C ja lintujen kasvaessa se lasketaan vähitellen lähelle 20 °C lämpötilaa.

Taulukko 8.1: Eläinten optimi ja kriittiset lämpötilat

Eläin	**Alempi kriittinen lämpötila °C**	**Ylempi kriittinen lämpötila °C**	**Optimi °C**
Lehmä	(-25) -15	23 ... 27	5 ... 15
Nuorkarja	(-15) 0	25 ... 30	10 ... 20
Vasikka	(0) 10	30	15 ... 25
Lihakarja yli 3 kk	(-35) -15	25 ... 30	-10 ... 15
Porsiva emakko	(5) 20	27 ... 32	10 ... 28
Porsas alle 2 vk	25	34	30 ... 32
Lihasika	(7) 15	25 ... 27	15 ... 22

Myös ilmankosteudelle, melulle ja kaasupitoisuuksille on suosituksensa. Ilman suhteellisen kosteuden suositus on maa- ja metsätalousministeriön ohjeiden [MMM-RMO C2.2] mukaan 80 %. Broileridirektiivin vaatimus on, ettei 48 tunnin aikana ilman suhteellinen kosteus ylitä 70%, kun ulkona on alle 10 °C. Kuvassa 8.2 on esimerkki boilerierän kasvatuksen aikaisesta lämpötilasta ja kosteudesta. Kasvatus alkaa 32 °C lämpötilasta ja lintujen kasvaessa lämpötilaa voidaan laskea. Tilan suhteellinen kosteus lisääntyy kasvatuksen aikana lintujen kasvaessa ja elintoimintojen lisääntyessä.



Kuva 8.2: Broilerierän aikainen tilan lämpötila ja kosteus

Ilman suhteellinen kosteus on ulkoilmassa elokuusta maaliskuuhun yli 80%. Kun ulkoilma otetaan ilmanvaihdon kautta rakennukseen, se lämpenee huonelämpötilaan. Ilman lämmetessä kosteussuhde (absoluuttinen kosteus) säilyy samana, mutta suhteellinen kosteus alenee. Eläimet luovuttavat kosteutta, joka taasen lisää suhteellista kosteutta.

Myös kaasupitoisuuksilla ja pölyille on omat suosituksensa, taulukko 8.2. Karjasuojissa käsitellään ja varastoidaan rehua, joka on biologista materiaalia. Lisäksi siellä voidaan liikkua konein. Tämä aiheuttaa pölyn muodostumista, mikä on haitallista sekä elämille että niiden hoitajille. Mitä pienempiä hiukkaset ovat, sen pidemmälle ne voivat tunkeutua hengitysteihin. Karkeammat hiukkaset poistuvat usein yskimällä. Hiukkasten läpimitta ilmoitetaan mikrometreinä (1 µm = 0,001mm). Ihmisillä 100 µm hiukkaset pääsevät nenään ja suuhun, 25 µm hiukkaset pääsevät ylähengitysteihin ja 5 - 10 µm pääsevät keuhkoputkiin.

Eläinten osalta noudatetaan melko lailla työntekijöiden arvoja. Useinkaan työntekijät eivät oleskele kahdeksaa tuntia eläinsuojassa, kun taasen eläimet voivat joutua olemaan siellä jatkuvasti.

Taulukko 8.2: Haitallisten kaasujen ja pölyn suositusarvoja eläinsuojissa ja työntekijöiden Haitalliseksi Tunnetut Pitoisuudet (HTP)

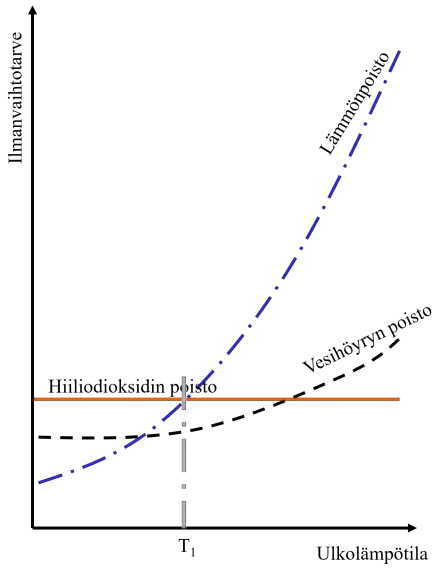
Aine	**Eläinsuoja enimmäispitoisuus** [MMM-RMO C2.2]	**Työntekijöiden HTP-arvo** [HTP-arvot(2020)STM]
Hiilidioksidi, CO_2	3000 ppm	5000
Ammoniakki, NH_3	10 ppm, siipikarja pehkulla 25 ppm	8 h altistus 20 ppm, 15 min altistus 50 ppm
Rikkivety, H_2S	0,5 ppm	8 h altistus 5 ppm, 15 min altistus 10 ppm
Hiilimonoksidi, häkä, CO	5 ppm	8 h altistus 20 ppm, 15 min altistus 5 ppm
Orgaaninen pöly	10 mg/m^3	8 h altistus 5 mg/m^3, 15 min altistus 10 mg/m^3

Asetetuille raja-arvoille on myös kritiikkiä, koska pelkät fyysiset olosuhteet eivät takaa hyvinvointia. Etenkin lämpötilojen osalta eläinten lämmöneristys, ruokinta, karjasuojan ominaisuudet ja ilmanvaihto vaihtelevat runsaasti. Tämän takia suositellaan enemmänkin eläinten käyttäytymisen havannointia.

8.3 Ilmanvaihto

Karjasuojien ilmanvaihdon ongelmana on, että rakennukset eivät ole usein kovin tiiveitä vaan esimerkiksi navetoissa voi olla säädettäviä verhoseiniä tai kulkureittejä voi olla auki. Tällöin ilmanvirtaukset eivät ole hallittuja ja suora ilman virtausnopeuden mittaaminen ei anna oikeaa tulosta. Tällöin käytetään epäsuoria mittauksia. Sikaloita ja kanaloita joudutaan lämmittämään kylminä kausina, jolloin niissä on normaalisti selvät ilman tulo- ja poistoaukot, jolloin ilmanvaihto voidaan mitata aukkojen luota suorana mittauksena. Ilmanvaihdon laskennassa täytyy usein käyttää normiointia, jotta tulokset olisivat vertailukelpoisia. Tämä voidaan tehdä yhtälön 5.9 avulla.

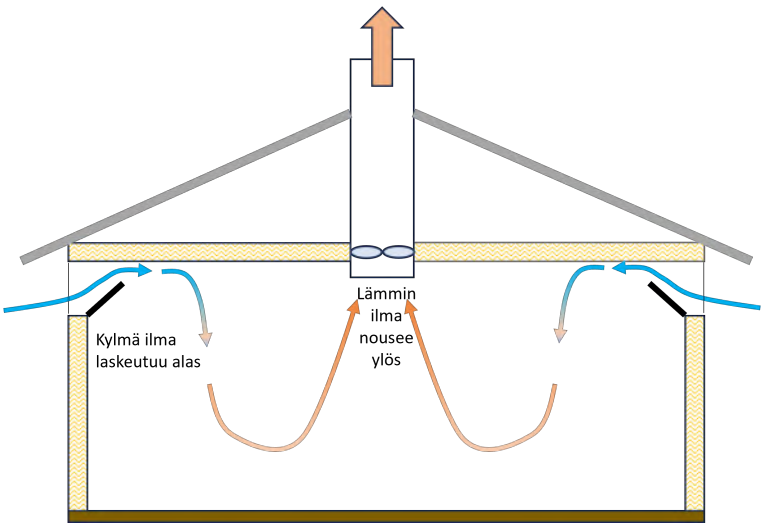
Ilmanvaihdon tarve muuttuu olosuhteiden muuttuessa. Kuvassa 8.3 on esimerkki ulkolämpötilan vaikutuksesta ilmanvaihtotarpeeseen. Kylmillä ilmoilla hiilidioksidin poisto määrittää ilmanvaihdon tarpeen, kun taasen lämpimillä ilmoilla lämmönpoisto on määräävänä tekijänä. Ilmanvaihdon ohjauksen pitäisikin toimia usean eri kriteetin mukaan.



Kuva 8.3: Ilmanvaihdon tarpeen muuttuminen ulkolämpötilan mukaan

8.3.1 Suora ilmanvaihdon mittaus

Suorassa ilmanvaihdon mittaus voidaan tehdä rakennuksista, joissa on selvät ilman tulo- ja poistoaukot, kuva 8.4. Mittaamalla tuloaukkojen virtausnopeudet ja kertomalla se aukon pinta-alalla saadaan virtausmäärä, yhtälö



Kuva 8.4: Koneellisen ilmanvaihdon imanvirtaukset

5.7. Virtausnopeus voidaan mitata esimerkiksi käsimittareilla tai huppumittarilla, jossa aukon virtaus johdetaan mittaushupun läpi.

Sikalan osasastossa on kymmenen sisääntuloaukkoa. Aukon koko on 50 cm x 25 cm. Keskimääräiseksi virtausnopeudeksi saatiin 0,8 m/s. Mikä on osaston ilmanvaihtomäärä? Ilmavirtauksen lämpötila on 12 ^{o}C ja ilmanpaine on 990 mbar, kuinka suuri on normioitu ilmanvaihto?
Sisääntuloaukkojen kokonaiskoko on $10 \cdot 0,5m \cdot 0,25m$ = 1,25 m^2. Ilmanvaihto on yhtälön 5.7 mukaan $q_v = 1,25m^2 \cdot 0,8m/s$ = 1,0 m^3/s = 3 600 m^3/h. Normiointiin käytetään yhtälöä 5.9, $q_{Nv} = q_v \cdot \frac{T_N}{T} \cdot \frac{p}{p_N} = 3600m^3/h \cdot \frac{273,15}{273,15+12} \cdot \frac{990}{1013,5}$= 3369 m^3/h

8.3.2 Epäsuora ilmanvaihdon mittaus

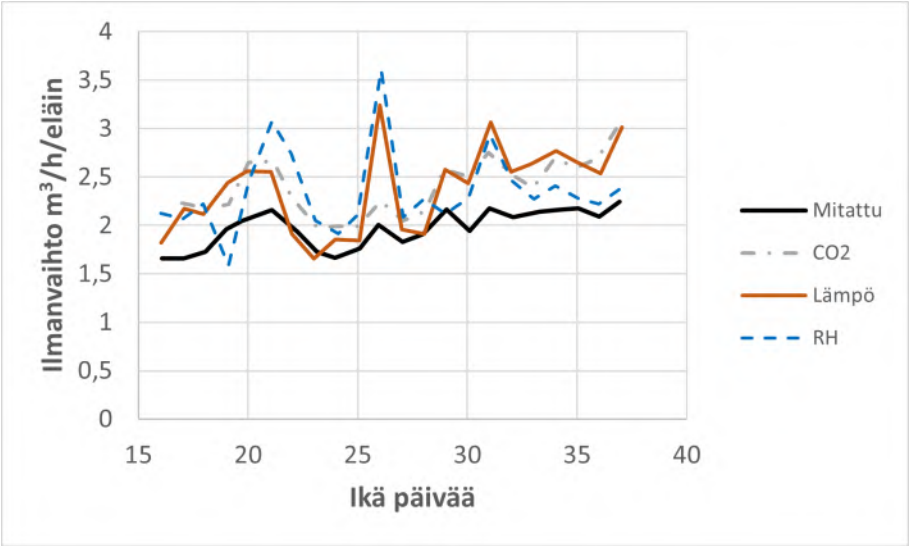
Epäsuoran ilmanvaihdon mittaamiseen käytetään hyväksi rakennuksen taseyhtälöitä. Taseyhtälöt muodostetaan lämpötaseen ja kaasutaseiden avulla. Niissä tarkastellaan sisään tulevan ilman ja poistuvan ilman sisältöjä sekä otetaan huomioon kuinka paljon eläimet tai toiminnot tuovat sisälle lämpöä tai kaasuja. Ilmanvaihto saadaan laskettua näiden avulla. Poistuvan ilman pitoisuudet ovat eläimistä ja toiminnoista johtuen suuremmat kuin tulevan ilman. Poistuvan ilman pitoisuus riippuu siitä, kuinka suuri ilmanvaihto on. Muodostamalla lämmölle tai kaasuille taseyhtälöt voidaan määrittää ilmanvaihto.

Epäsuoran mittauksen tarkkuus riippuu siitä, kuinka hyvin eläinten ja muiden toimintojen tuotot pystytään arvioimaan. Kuvassa 8.5 on esimerkki broilerihallista mitatusta ilmanvaihdosta. Mitatun arvon lisäksi ilmanvaihto on laskettu hiilidioksidi (CO_2), lämpö ja suhteellisen kosteuden (RH) taseiden perusteella. Epäsuorat mittaukset ovat tässä tapauksessa antaneet keskimäärin 20% mitattua suuremman ilmanvaihdon. Huolellisesti tehtynä päästään jopa muutaman prosentin eroon mitatun ja epäsuorasti määritetyn tuloksen välillä [S. Pedersen]. Epäsuorassa mittauksessa lämpötilaeron pitäisi olla vähintään 2°C, kosteuseron vähintään 0,5 g/m^3 ja hiilidioksidieron yli 200 ppm [S. Pedersen].

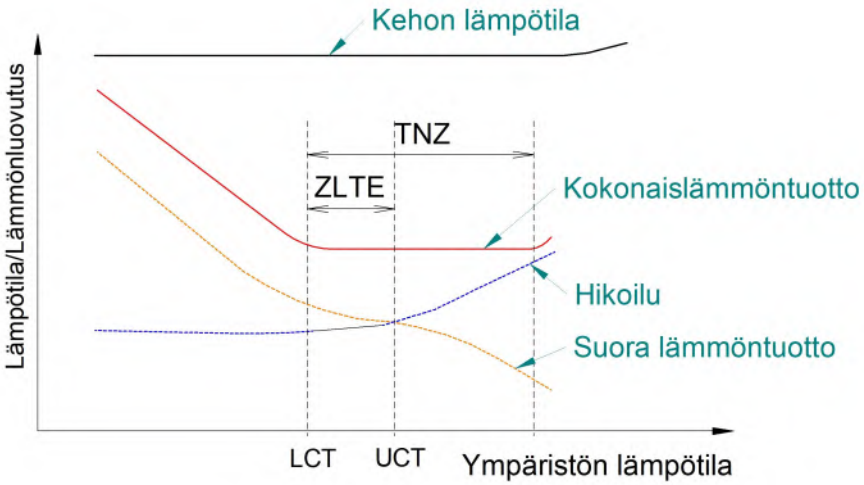
8.3.2.1 Eläinten lämmön ja kaasujen tuotto

Eläin käyttää rehua elintoimintoihinsa. Tarpeeseen vaikuttaa lämpötila, aktiviteetti ja tuotanto (kananmunat, maito, liha). Eläin tuottaa lämpöä karjarakennukseen. Tuotettu lämpö tulee kahdessa muodossa, suoraan eläimestä poistuvana lämpönä ja hikoiluna, mikä tarkoittaa ihon ja hengityksen mukana tulevana vesihöyrynä. Hikoilua varten eläin joutuu höyrystämään vettä. Suora lämmönluovutus näkyy rakennuksissa lämpötilan nousuna ja hikoilu suhteellisen kosteuden nousuna. 'Hikoilun' oikeampi termi on latentti lämmönluovotus, mikä tarkoittaa lämpöenergiaa, joka sitoutuu tai vapautuu aineen olomuodon muutoksessa. Tässä tapauksessa veden höyrystyminen sitoo lämpöä, jonka eläin joutuu tuottamaan. Kylmässä suora lämmöntuotto on suurempaa, koska eläimen pitää pitää kehon lämpötila yllä. Lämpötilan kohotessa yhä enemmän lämpöä poistuu hikoiluna.

Eläinten lämmön ja vesihöyryn tuotto tiedetään kohtuullisesti, taulukko 8.3. Näille arvoille on olemassa myös laskentayhtälöitä, jotka ottavat paremmin huomioon eläimen painon ja esimerkiksi lehmillä maidontuoton. Näistä löytyy yksityiskohtaiset selostukset Mannforsin ja Hautalan julkaisussa [Mannfors B. ja Hautala M.] ja julkaisuun liittyvät ilmanvaihtolaskurit on ladattavissa sivustolta https://www.energia.agrotekno.fi/laskureita/.



Kuva 8.5: Eri tavoilla mitattu broilerihallin ilmanvaihtomäärä [S. Pedersen]



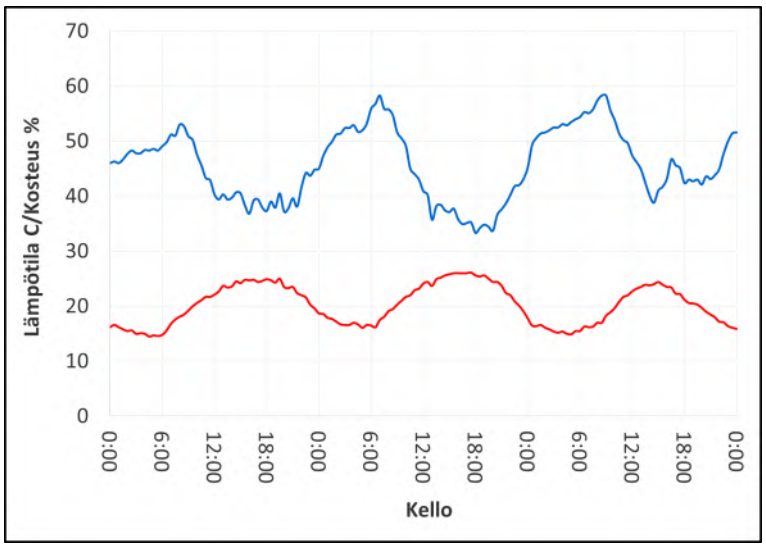
Kuva 8.6: Eläimen lämmöntuotto ja lämpöalueet, LCT=Lower Critical Temperature, UCT=Upper Critical Temperature, TNZ=Temperature Neutral Zone, ZLTE= Zone of Least Thermoregulatory Effort

Kuvassa 8.6 on kaavakuvana eläimen lämmöntuotto ympäristön lämpötilan muuttuessa. LCT tarkoittaa alempaa kriittistä lämpötilaa, jolloin esimerkiksi lypsylehmä joutuu alentamaan maidon tuottoa, jotta kehon lämpötila pysyisi yllä. Ylemmässä kriittisesessä lämpötilassa (UCT) eläin joutuu hikoilemaan enemmän poistaakseen lämpöä ja myös vähentämään syömistä. Eläinten kriittisten lämpötilalueiden suositukset ovat taulukossa 8.1. Alue, jossa eläimen kokonaislämmöntuotto on alimmillaan on lämpöneutraali alue (TNZ). Nykyisin suositellaan lämpömukavuusalueen käyttöä (ZLTE), joka ulottuu alemmasta kriittisestä lämpötilasta ylempään.

Karjasuojan olosuhteet muuttuvut ulkoilman olosuhteiden (lämpötila, kosteus, tuuli) muuttuessa. Myös eläimillä on oma vuorokausirytmi, joka vaikuttaa olosuhteisiin. Kuvassa 8.7 on esimerkki kolmen vuorokauden aikaisesta sikalan lämpötilan ja kosteuden vaihtelusta. Vuorokausirytmi vaikuttaa olosuhteisiin. Tämä tarkoittaa sitä, että yksittäinen mittaus ei kerro kovinkaan paljon olosuhteista, vaan tarvitaan pidempiaikainen seuranta.

Maa- ja metsätalousministeriön suosituksissa [MMM-RMO C2.2] on myös taulukoitu eläinten tyypillisiä lämmön ja kosteuden luovutusarvoja, taulukko 8.3. Taulukossa on annettu suora lämmöntuotto ja kosteuden tuotto. Kosteuden tuoton ja latentin lämmöntuoton (hikoilu) välillä on selvä fysikaalinen yhteys. Veden ominaishöyrystymislämpö on 0 ºC lämpötilassa 2500 kJ/kg ja 100 0 ºC 2257 kJ/kg. Eläimen tuottama kosteus on n 10 ºC lämpötilassa yhtälön 8.1 mukainen.

$$q_{H_2O}[g/h] = \frac{P_{lat}[W]}{0,68[\frac{W \cdot h}{g}]}] \tag{8.1}$$



Kuva 8.7: Sikalan kosteuden (ylempi käyrä) ja lämpötilan muutokset kolmen vuorokauden aikana

Esimerkki. *Lypsylehmän suora lämmöntuotto on 700 W ja kosteuden tuotto on 400 g/h. Kuinka suuri on latentti lämpöteho?*
Ratkaistaan yhtälöstä 8.1 latentti lämpöteho, $P_{lat} = 0,68 \cdot q_{H_2O} = 0,68 \cdot 400 =$ *272 W. Kokonaislämpöteho on 700+272 = 972 W.*

Taulukkoarvojen sijaan lämmöntuotto voidaan laskea sitä varten kehitetyillä empiirisillä yhtälöillä. Ne ovat tarkempia kuin tässä käytetyt taulukkoarvot, koska niissä laskennassa on mukana lämpötila, paino ja esim. lypsylehmällä maidon tuotto. Tämä laskenta on selvitetty mm Mannforsin ja Hautalan raportissa [Mannfors B. ja Hautala M.].

Lämmön ja vesihöyryn lisäksi eläin tuottaa kaasuja, hiidioksidia ja ammoniakkia. Hiilidioksidin tuotanto riippuu eläimen kokonaislämmöntuotannosta siten, että sitä syntyy 1 l jokaista 24,7 kJ kokonaislämmöntuottoa kohden tai toisina yksikköinä 1 l jokaista 6,7 Wh kohti [Albright]. Hiilidioksidin tiheys on 1,98 kg/m^3 eli se on 1,5 kertaa tiheämpää kuin ilma.

Esimerkki. *Kuinka paljon edellisen esimerkin lypsylehmä tuottaa hiilidioksidia?*

Kokonaislämmöntuotto oli 972 W. Tunnissa on 972 Wh, jolloin $\frac{972}{6,7} =$ *145 l/h tai* $0,145\frac{m^3}{h} \cdot 1,98\frac{kg}{m^3} =$ *0,29 kg/h.*

8.3.2.2 Lämpötasapaino

Ennenkuin voimme tarkastella lämpötasapainoa on syytä kerrata muutamia rakennusten lämpöhäviöhin liittyvää fysiikkaa.

Lämmön johtumisessa siirtyvä lämpöteho saadaan yhtälöstä 8.2.

$$P = \lambda \cdot A \frac{\Delta T}{L} \tag{8.2}$$

P	Lämpöteho
λ	Lämmönjohtavuus, taulukko 8.4
A	Virtauksen poikkileikkausala
ΔT	Lämpötilaero
L	Seinämän paksuus

Seinän lämmönjohtavuus riippuu sen rakenteesta. Eniten lämmönjohtavuuteen vaikuttaa eristemateriaali ja sen paksuus. Lämpö voi siirtyä seinän läpi konvektion avulla, jos siinä ei ole kunnon tuulensuojaa. Tällöin voimakas tuuli puhaltaa eristemateriaalin läpi ja se toimii lämmöneristeen sijasta ilman suodattimena. Samoin kosteus voi tuhota lämmöneristeen. Jos kosteus pääsee lämmöneristeen sisään ja kondensoituu sinne, eristyskyky häviää ja sisälle alkaa muodostumaan homeita.

Materiaalien lämmönjohtavuuskertoimiin vaikuttaa materiaalin kosteus sekä myös lämpötila. Todellisuudessa kertoimet eivätkään ole täysin vakioita, vaan ne muuttuvat hieman olosuhteiden mukana. Seinämärakenteissa

Taulukko 8.3: Kotieläinten lämmön, kosteuden ja hiilidioksidin tuotto [MMM-RMO C2.2]

Eläin	Paino kg	Ikä	Kokonais-lämmön-tuotto[1] W/eläin	Suora lämmön-tuotto W/eläin	Kosteuden tuotto g/h/eläin	Hiilidioksi-din tuotto g/h/eläin
Lypsylehmä	400 - 500		972	700	400	287
Lypsylehmä	600		1106	800	450	327
Lypsylehmä	700		1190	850	500	352
Hieho ja ummessa oleva lehmä	500		872	600	400	258
Nuorkarja, uudistus	400	18 kk	704	500	300	208
Nuorkarja, uudistus	300	9 kk	570	400	250	168
Nuorkarja, uudistus	150	5 kk	352	250	150	104
Lihakarja	600	20 kk	1110	600	750	328
Lihakarja	500	16 kk	890	550	500	263
Lihakarja	300	10 kk	706	400	450	209
Lihakarja	200	6 kk	588	350	350	174
Lihakarja	100	3 kk	386	250	200	114
Joutilas emakko, karju	200		418	350	100	124
Porsas	20	3 kk	101	60	60	30
Porsas	10	1 kk	57	30	40	17
Lihasika	110	5 - 7 kk	302	200	150	89
Lihasika	90	3 - 5 kk	232	150	120	69
Lihasika	60	2 - 3 kk	161	100	90	48
Lihasika	30	1 - 2 kk	123	75	70	36
Kana	2	$>$ 5 kk	13	10	5	3,8
Broileri	1,7	35 vrk	13	10	5	3,8
Broileri	1,0	25 vrk	13	10	5	3,8
Broileri	0,5	16 vrk	7	5	2,5	2,1
Broileri	0,1	5 vrk	1,7	1	1	0,5
Lammas	$<$ 100		786	650	200	232
Lammas	10		64	50	20	19
Hevonen	500		800	650	220	236

[1]Kokonaislämmöntuotto ja hiilidioksidin tuotto on laskennallisesti lisätty alkuperäisen taulukkoon

Taulukko 8.4: Eri materiaalien lämmönjohtavuuksia

Materiaali	Tilavuus-paino kg/m^3	Lämmönjohtavuus λ $\frac{W}{m \cdot K}$
Ilma	1,2	0,024
Leca-sora	270 - 400	0,08 - 0,10
Lasivilla	50 - 70	0,045 - 0,050
Vuorivilla	80 - 200	0,040 - 0,070
Sahanpuru	120 - 200	0,08 - 0,12
Tiiliseinä	1600 - 1800	0,4 - 0,9
Puu	500	0,14
Betoni	2300	1,7
Vilja	600 - 800	0,13 - 0,14[1]

[1]*14 % kosteus*

ei käytetä pelkästään yhtä materiaalia, vaan ne koostuvat useista erilaisista materiaaleista. Tälläisen kerroksen lämmönsiirtyminen lasketaan lämmönsiirtokertoimen eli U-kertoimen avulla (aiemmin k-kerroin). Kunkin kerroksen U-kerroin saadaan yhtälöstä 8.3.

$$U = \frac{\lambda}{L} \tag{8.3}$$

Kun kunkin kerroksen lämmönsiirtymiskerroin on laskettu, koko seinämän kerroin saadaan yhtälöllä

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{U_1} + \frac{1}{U_2} + ...\frac{1}{U_n} \tag{8.4}$$

Kun koko seinämän U-kerroin on laskettu, seinämän läpi siirtynyt lämpöteho saadaan yhtälöllä 8.5.

$$P = U \cdot A \cdot \Delta T \tag{8.5}$$

Sekä seinän sisäpinnalle että ulkopinnalle muodostuu ilman rajakerros, joka on muutaman mm paksuinen. Nämä rajakerrokset parantavat seinän eristyskykyä. Ulkoseinän laskennassa rajakerroksen tyypillinen U-kerroin on 25 $\frac{W}{m^2 \cdot K}$ ja sisäseinän 7,7 $\frac{W}{m^2 \cdot K}$. Lämpötilaero on, kun rajakerrokset otetaan huomioon, sisä- ja ulkolämpötiloja. Jos lasketaan pelkän seinärakenteen lämpövuo, silloin lämpötilaero lasketaan rakenteiden pintalämpötilojen mukaan. Tuuli vaikuttaa etenkin ulkopuolella rajakerrokseen ja sitä kautta lämpöhäviö kasvaa rajakerroksen heikentyessä ja U-arvon kasvaessa. Hyvin eristetyn rakenteen rajakerroksen vaikutus on vähäinen ja sitä ei usein oteta huomioon.

Esimerkki. *Seinä muodostuu 150 mm paksusta lasivillasta (0,05 W/mK) ja sen kahta puolta olevasta 22 m paksusta laudasta (0,14 W/mK). Kuinka suuri on 50 m^2 seinän läpi tapahtuva lämpötehon virtaus, kun sisälämpötila on 22 ºC ja ulkolämpötila -18 ºC? Rajakerroksia ei oteta huomioon.*

U-arvot eri osille ovat:
- lauta ulkopuolella $U_1 = \frac{0{,}14}{0{,}022} = 6{,}36\ \frac{W}{m^2 \cdot K}$
- eriste $U_2 = \frac{0{,}05}{0{,}15} = 0{,}33\ \frac{W}{m^2 \cdot K}$
- lauta sisäpuolella $U_3 = U_1$
Koko seinamän k-arvo on: $\frac{1}{U} = \frac{1}{6{,}36} + \frac{1}{0{,}33} + \frac{1}{6{,}36}$, $\frac{1}{U} = 3{,}34 \Rightarrow U = 0{,}30\ \frac{W}{m^2 \cdot K}$. *Lämpötilaero on* $\Delta T = 22 - (-18) = 40K$. *Seinämän läpi virtaava lämpöteho on* $P = 0,30 \cdot 50 \cdot 40 = 600\ W$.

Asuinrakennuksen seinämien U-kertoimen pitää olla vähintään 0,17 W/(m^{2}K) ja yläpohjan 0,09 . Ovien sekä ikkunoiden kohdalla U-arvo on luokkaa 2 - 3 W/(m^{2}K). Ikkunoiden kautta tulee myös lämpöä sisään kesällä, kun auringon säteily lämmittää rakenteita.

Kylmissä tai puolikylmissä navetoissa käytetään verhoseiniä. Yksinkertaisen verhoseinän lämmönsiirtokerroin U on 10$\frac{W}{m^2 K}$ ja kaksinkertaisen U on 3 $\frac{W}{m^2 K}$.

Lämpötasapainossa tarkastellaan rakennukseen tulevaa lämpöä ja sieltä poistuvaa lämpöä, kuva 8.8. Laskentaa varten pitää tietää eläinten tuottama lämpö ($\Phi_{\text{eläin}}$), koneiden ja lämmityksen tuottama lämpö ($\Phi_{\text{lämmitys}}$), rakennuksen lämpöhäviöt ($\Phi_{\text{seinä}}$+ Φ_{katto}+ Φ_{lattia}), auringon säteilyteho ($\Phi_{\text{säteily}}$) ja sisällä lannasta tuleva lämpö (Φ_{lanta}). Rakennusten lämpöhäviöitä varten pitää tietää rakennuksen U-arvot ja lämpötilaerot.

Kun muodostetaan tasapainoyhtälöt edellisten lämmöntuottojen ja häviöiden sekä ilmanvaihdon osalta saadaan yhtälö 8.6. Ilmanvaihdon mukana kulkeva lämpö (Φ_{iv}) saadaan ilmanvaihtomäärästä q_{v} ja ulko- ja sisälämpötilojen erosta, yhtälö 8.7.

$$\phi_{eläin} + \phi_{säteily} + \phi_{lämmitys} + \phi_{lanta} = \phi_{rakennus} + \phi_{iv} \tag{8.6}$$

$$\Phi_{iv} = q_v \cdot c_i \cdot r_i (T_s - T_u) \tag{8.7}$$

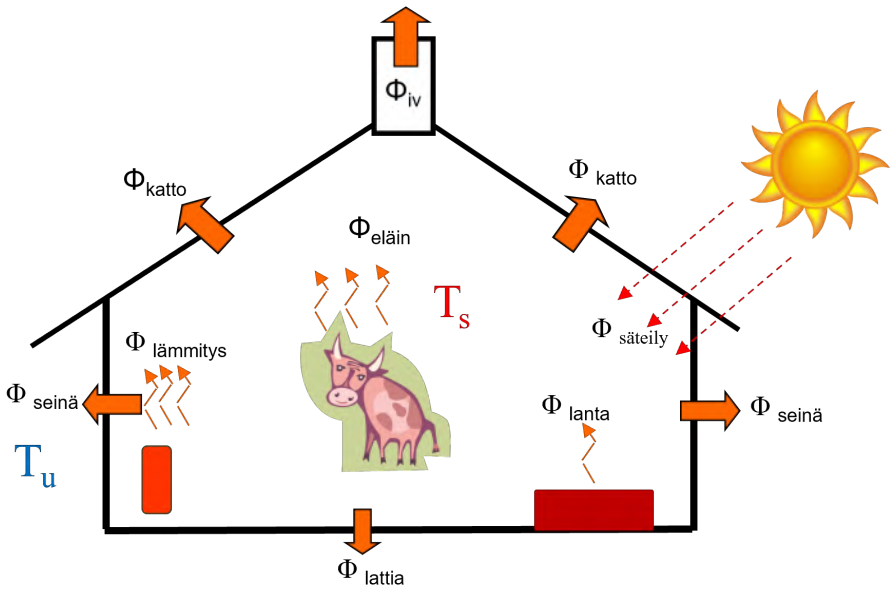
Ratkaistaan yhtälöistä ilmanvaihtomäärä, jolloin saadaan yhtälö 8.8.

$$q_v = \frac{\phi_{eläin} + \phi_{säteily} + \phi_{lämmitys} + \phi_{lanta} - \phi_{rakennus}}{c_i \cdot r_i (T_s - T_u)} \tag{8.8}$$

Seinien ja katon läpi menevä lämpövirta saadaan yhtälöstä

$$P = U \cdot A \cdot \Delta T \tag{8.9}$$

P	Lämpövirta
U	Rakenteen U-arvo, lämmönläpäisykerroin
A	Pinta-ala
ΔT	Lämpötilaero rakenteen kahtapuolen



Kuva 8.8: Karjarakennuksen lämpötasapaino

Alapohjan lämpöhäviön suuruuden ratkaisee rakennuksen ympäryspiirimitta. Laatalla olevan rakennuksen reunasta 2 m katsotaan vaikuttavan lämmönsiirtymiseen [Albright]. Keskellä rakennusta lämmönsiirtyminen lattian läpi on niin pientä, ettei sitä tarvitse ottaa huomioon.Alapohjan lämpöhäviö voidaan laskea yhtälön 8.9 avulla, kun pinta-alana käytetään lattian ulkopiirin ja 2m leveyden tuloa. Lattioiden U-arvo on kylmissä ja eristämättömissä tiloissa 1,4 - 1,6 W/mK ja eristetyissä rakenteissa 0,8 - 0,9 W/mK.

Lämpimien rakennusten alapohjan lämpöhäviöille on myös karkeampi laskutapa, jossa lämpöhäviö on luokkaa 6 W/m^2 pohjapinta-alan ollessa 300 m^2 ja 13 W/m^2 pohjapinta-alan ollessa 50 m^2. Lämpöhäviö voidaan tietysti laskea lattian eri osille erikseen, kun tiedetään kunkin osan lämmönjohtavuus ja lämpötilaerot.

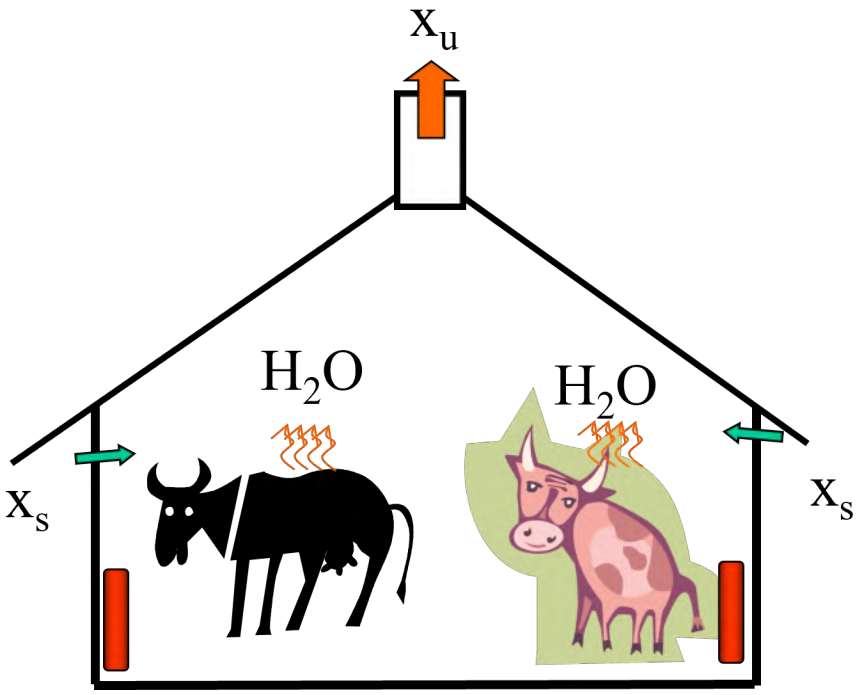
Esimerkki. *Rakennuksen koko on 20 m x 40 m ja sisäkorkeus on 3 m. Seinien U-arvo on 0,4 W/m^{2}K, yläpohjan 0,3 W/m^{2}K ja alapohjan 0,8 W/m^{2}K. Ulkolämpötila on -14 °C ja sisälämpötila 14 °C. Rakennuksessa on 100 lehmää ja sää on pilvinen (auringon säteilyvaikutus mitätön). Lannan lämmöntuotto katsotaan myös mitättömäksi. Lämmitys ja koneet tuottavat rakennukseen 21 kW lämpötehon.*
Lehmän suora lämmöntuotto on taulukon 8.3 mukaan 700 - 850 W, käytetään arvona 800 W. Rakennukseen tulee lämpöä eläimistä siten 100·0,8 kW = 80 kW. Seinien pinta-ala saadaan piiristä ja seinä korkeudesta, (20+20+40+40)·3= 360 m^2. Seinien läpi menevä lämpövirta on yhtälön 8.9 mukaan $P = 0,4\frac{W}{m^2K} \cdot 360m^2 \cdot (14-(-14))$ *= 4,0 kW. Yläpohjan läpi menevä lämpövirta on vastaavasti (kattopinta-ala on 20·40= 800 m^2), P= 6,7 kW. Lasketaan pohjan kautta tapahtuva lämpöhäviö eristetyn pohjan mukaisesti. Pinta-ala on piiri 120m x reunus 2 m = 240 m^2. Lämpövirta on, P= 5,4 kW. Kokonaislämpöhäviö on siten 4,0+6,7+5,4 = 16,1 kW. Ilman tiheys on sisäilman lämpötilassa (yhtälö 1.3)* $r = \frac{p_i M_i}{RT} = \frac{101325Pa \cdot 28,97\frac{kg}{kmol}}{8,3147\frac{J}{K \cdot mol} \cdot (273,15+14)K} = 1,23$ *kg/m^3. Lämpötasapainon mukainen ilmanvaihto on siten* $q_v = \frac{80+0+21+0-16,1}{1,00 \cdot 1,23 \cdot (14-(-14))} = 2,5$ *m^3/s = 8900 m^3/h.*

8.3.2.3 Kosteustasapaino

Kosteustasapainossa tarkastellaan karjarakennukseen tulevan ilman kosteutta ja sieltä poistuvan ilman kosteutta. Eläimistä, lannasta ja pesuvedestä tulee ilmaan lisäkosteutta. Eniten kosteutta tulee eläimistä. Kun eläinmäärä ja niiden tuottama kosteus sekä mahdollinen muu rakennuksessa syntyvä kosteus tiedetään, samoinkuin tulevan ja poistuvan ilman kosteussuhteet, tästä saadaan ilmanvaihtomääräälle yhtälö 8.10.

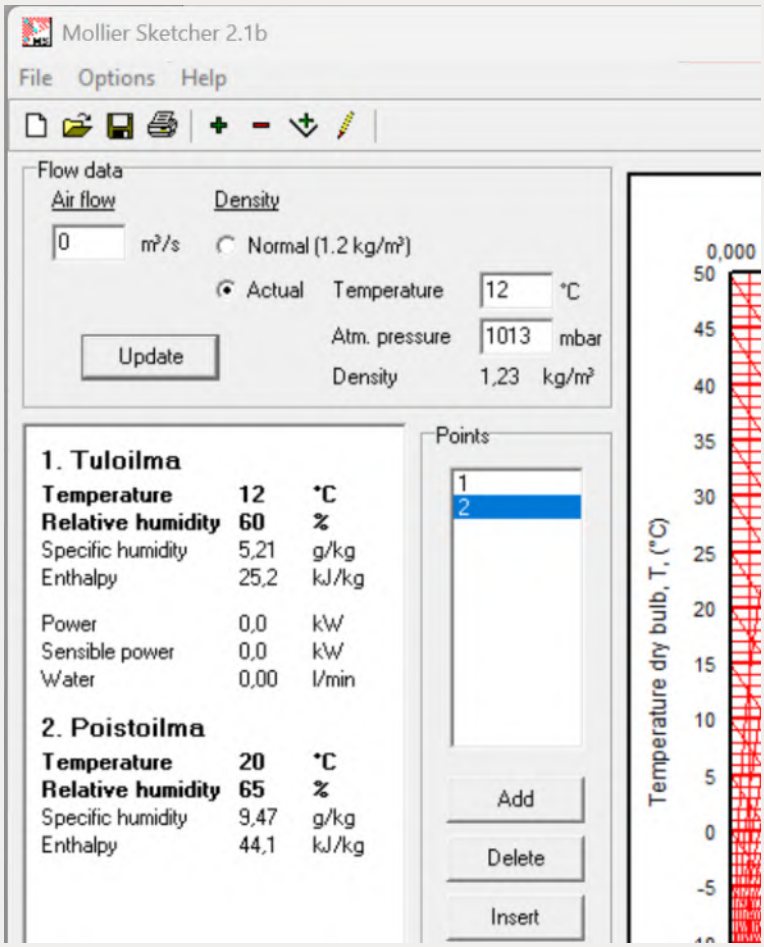
$$q_{iv} = \frac{q_r}{r \cdot (x_u - x_s)} \tag{8.10}$$

q_{iv}	Ilmanvaihto, m^3/h
q_r	Kosteuden tuotto rakennuksessa, g/h
x_s	Sisään tulevan ilman kosteussuhde, g/kg
x_u	Poistuvan ilman kosteussuhde, g/kg
r	ilman tiheys



Kuva 8.9: Karjarakennuksen kosteustasapaino

Esimerkki. *Navetassa on 65 lehmää, sisään tulevan ilman lämpötila on 12 °C ja kosteus 60 %. Poistoilman lämpötila on 20 °C ja kosteus 65 %. Mikä on navetan ilmanvaihtomäärä ?*
Käytetään laskussa Mollier Sketcher ohjelmaa. Tuloilman kosteussuhde on 5,21 g/kg ja poistoilman 9,47 g/kg. Taulukon 8.3 mukaan 600 kg painava lypsylehmä tuottaa 450 g/h kosteutta. Muu kosteuden tuotto rakennuksessa on pientä ja sitä ei tarvitse ottaa huomioon. Lehmiä on 65, jolloin kokonaistuotto on $q_r = 65 \cdot 450 g/h = 29250\ g/h$. *Lasketaan ilmanvaihto rakennukseen tulevan ilman arvojen mukaan. Mollier Sketcer antaa sen mukaiseksi ilman tiheydeksi 1,23 kg/m³. Ilmanvaihto on tämän mukaan laskettuna* $q_{iv} = \frac{29250}{1{,}23 \cdot (9{,}47 - 5{,}21)} = 5580\ m^3/h$.



8.3.2.4 Hiilidioksiditasapaino

Samalla lailla kuin kosteustasapainossa ilmanvaihto voidaan laskea hiilidioksiditasapainon avulla. Taulukossa 8.3 on myös arvot eläinten hiilidioksidin tuotosta. Tämän perusteella voidaan laskea ilmanvaihtomäärä yhtälön 8.11 mukaisesti.

$$q_{iv} = \frac{q_{CO_2}}{(CO_{2u} - CO_{2s})} \cdot 10^6 \tag{8.11}$$

q_{iv}	Ilmanvaihto [m^3/h]
q_{CO_2}	Eläinten tuottama hiilidioksidivirtaus [m^3/h]
CO_{2s}	Sisään tulevan ilman hiilidioksidipitoisuus [ppm]
CO_{2u}	Poistuvan ilman hiilidioksidipitoisuus [ppm]

Esimerkki. *Navetassa on 65 lehmää, sisään tulevan ilman hiilidioksidipitoisuus on 400 ppm ja poistoilman 1340 ppm. Kuinka suuri on ilmanvaihtomäärä ?*
Taulukon 8.3 mukaan 600 kg painavan lehmän hiilidioksidin tuotto on 327 g/h. Hiilidioksidin tiheys on 1,98 kg/m^3, jolloin sen tilavuusvirtaus on $\frac{65 \cdot 0{,}327}{1{,}98} = 10{,}7$ m^3/h. Ilmanvaihtomäärä on siten $q_{iv} = \frac{10{,}7}{(1340-400)} \cdot 10^6 = 11420$ m^3/h.

8.4 Päästöjen mittaus

8.4.1 Karjasuojien päästöt

Karja ja sen lanta tuottavat erilaisia päästöjä, jotka leviävät rakennuksesta ympäristöön. Ongelmallisina nähdään ammoniakin ja metaanin tuotto. Rakennusten kaasupitoisuudet kertovat vain sisäilmaston tilan. Ilmanvaihto vie mukanaan kaasuja ulos. Kun poistoilman pitoisuus ja ilman virtausmäärä tiedetään, tästä voidaan laskea päästömäärät. Pitoisuudet ilmoitetaan usein yksikkönä ppm (part per million, miljoonasosa) ja päästöt massavirtauksena (kg/s, t/a). Laskentaan tarvitaan tämän takia kaasujen tiheydet, jotta tilavuusosat voidaan muuttaa massoiksi. Kaasun tiheys voidaan laskea normiolosuhteissa yhtälön 1.4 avulla. Päästömäärä saadaan kertomalla normiotu ilmanvaihtomäärä (yhtälö 5.9) käsiteltävän kaasun pitoisuudella, yhtälö 8.12.

$$q_x = q_{iv} \cdot C_x \cdot r_x \tag{8.12}$$

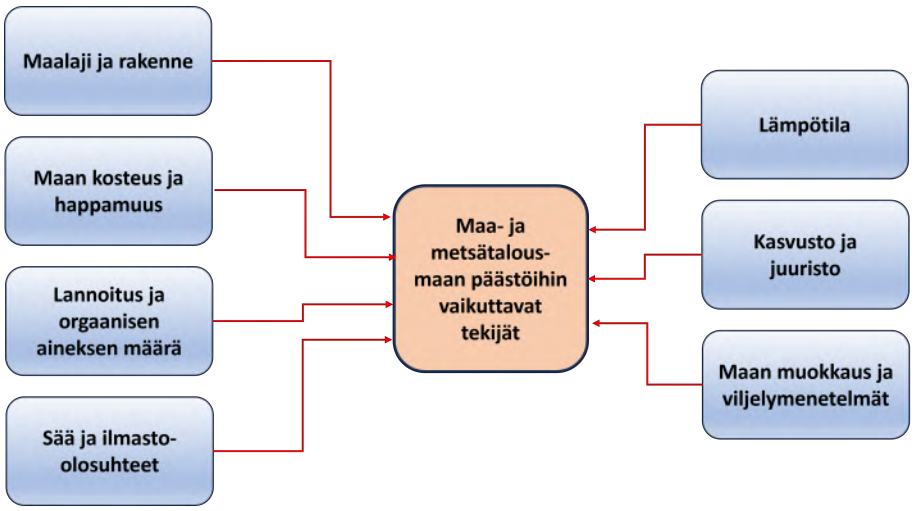
q_x	Kaasun x päästövirtaus
q_{iv}	Ilmanvaihto, m^3/h, normiolosuhde, ks kappale 5.2
C_x	Kaasun x pitoisuus
r_x	Kaasun x tiheys normiolosuhteissa

Päästöt lasketaan kuivan ilman mukaan. Jos mittaus on tehty kosteana, saatu mittausarvo pitää muuttaa yhtälön 1.6 avulla kuivan ilman arvoksi.

Mittaustuloksina saatiin, että navetan ammoniakkipitoisuus oli 5 ppm ja ilmanvaihtomäärä oli 0 °C ja 1 atm normiolosuhteessa 12000 m^3/h. Mikä on ammoniakkipäästön virtaus?
Tilavuusvirtauksesta on ammoniakkia 5 ppm, jolloin ammoniakin virtaus on $\frac{5}{1000000} \cdot 12000 m^3/h = 0{,}06$ m^3/h. Muutetaan tämä massavirtaukseksi. Ammoniakin moolimassa on 17,0 kg/kmol, yhtälön 1.3 mukaan saadaan ammoniakin tiheydeksi $r_{NH_3} = \frac{17{,}0 kg/kmol}{22{,}4 m^3/kmol} = 0{,}76$ kg/m^3. Massavirtaus on $0{,}06 m^3/h \cdot 0{,}76 kg/m^3 = 46$ g/h. Vuodessa 8760 tuntia, jolloin vuoden päästömäärä on 399 kg/vuosi.

8.4.2 Haihtuvien päästöjen mittaaminen (Greenhouse Gas Flux)

Maaperässä ja lannassa tapahtuu biologisia ja fysikaalis-kemiallisia prosesseja, jonka seurauksen niistä tulee haihtumalla päästöjä (kaasuvuo, gas flux) . Lannasta tulee tyypillisesti ammoniakkipäästöjä ja maaperästä hiilidioksidia (CO_2), dityppioksidia (N_2O, ilokaasu, typpioksiduli) ja metaania (CH_4). Metaani ja dityppioksidi ovat haitallisia ilmastokaasuja ja niiden kertoimet ovat hiilidioksidiin verrattuna seuraavat: ei fossiili metaani 27,0, fossiili metaani 29,8, typpioksidi 273 [IPCC AR6]. Siten esimerkiksi typpioksidi on 273 kertaa haitallisempaa kuin hiilidioksidi. Kansainvälisen ilmastopaneelin haitallisten kaasujen kertoimet muuttuvat eri raportointikausina. Sen seurauksena voit törmätä muunlaisiin kertoimiin kuin tässä olevat AR6 raportin lukemat. Typpioksidin elinikä ilmakehässä on 114 vuotta ja metaanin 12 vuotta. Typpioksidi tuhoaa ozonikerrosta. Maa- ja metsätaloudessa typpioksidia haihtuu maaperästä ja siihen vaikuttavia tekijöitä on esitetty kuvassa 8.10.



Kuva 8.10: Maaperän päästöihin vaikuttavia tekijöitä

Kuva 8.11: Maan kosteuden periaatteellinen vaikutus typpioksidulipäästöön [ChatGPT]

Bakteerit muuttavat maassa typpiyhdisteitä toiseen muotoon. Tähän ne tarvitsevat maan huokosissa olevaa happea. Jos maan ravinnetaso on alhainen, silloin myös muunnettavaa typpeä on vähän ja päästöt ovat alhaiset. Jos maa on märkää, silloin happea on vähän, maassa on puoliaerobinen tila, ja dityppioksidia syntyy muunnoksessa enemmän. Täysin vettyneessä maassa on hapeton tila, jolloin muodostuu metaania. Kuvassa 8.11 on esimerkki maan kosteuden vaikutuksesta maaperän typpioksidulipäästöihin.

Karjasuojissa lanta ja etenkin virtsa ovat ammoniakkipäästöjen lähteenä. Ureaasi on entsyymi, joka hajoittaa virtsan ammoniaksi ja se haihtuu lannasta kaasuna. Ureaasia on luonnostaan maaperässä ja ulosteissa. Haihtumiseen vaikuttaa lannan lämpötila, lannan pinta ja pinnalla ilmavirtaukset. Esimerkiksi pinnan peittämisellä voidaan rajoittaa ammoniakin haihtumista. Näin tehdään lietelanta-altaissa.

Metaania syntyy hapettomassa orgaanisen aineen hajoamisessa vettyneessä maaperässä, lannassa tai märehtijöiden pötsissä.

Kasvihuonekaasuille on eurooppalainen ja maailmanlaajuinen mittausverkosto. Eurooppalaisia lähes realiaikaisia tuloksia on nähtävissä ICOS (Integrated Carbon Observation System) sivustolla. Suomalaisia mittaustuloksia on nähtävissä SmartSMEAR sivustolla.

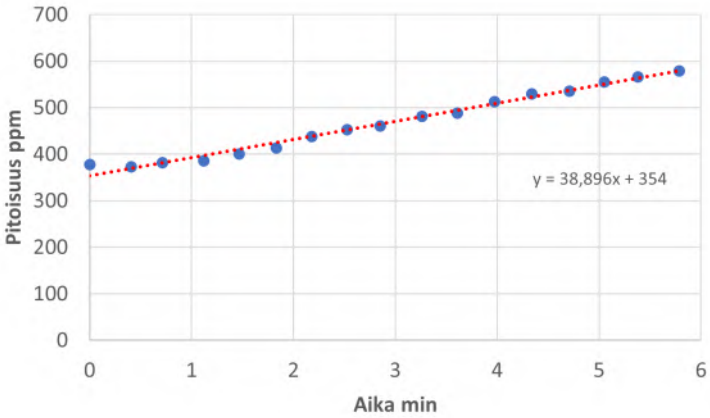
Kammiomittaus

Haihtuvien päästöjen mittaamisessa käytetään usein kammiomittausmenetelmää (GHG flux chamfer), kuva 8.12. Maaperän päästömittauksessa kammion reunat työnnetään maahan kaasuvuotojen estämiseksi. Mittaus on usein dynaaminen, jolloin kammion sisällä on tuuletin tai näyte kiertää jatkuvasti analysaattoriin. Ilman kiertoa näytekaasut kerrostuvat kammiossa. Kammiosta voidaan ottaa näytteitä, jotka analysoidaan laboratoriossa tai kaasujen konsentraatiomuutoksia seurataan suoraan analysaattorilla.

Kuvassa 8.13 on esimerkki kammiomittauksen tuloksesta. Kuvassa mittapisteiden kautta on määritetty lineaarisen regression suora. Yhtälön ($y = 38,896 \cdot x + 354$) kerroin 38,896 on konsentraation nousunopeus eli

Kuva 8.12: Lannan ammoniakkipäästön mittaus kammion avulla

pitoisuus lisääntyy 38,896 ppm/min. Regressiosuoran sijaan pitoisuuden muutos voidaan laskea siitä kuinka paljon pitoisuus nousee tietyssä ajassa.



Kuva 8.13: Esimerkki kammiomittauksen tuloksesta

Esimerkki. *Valitaan kuvasta 8.13 alkuajaksi 1 min ja loppuajaksi 5 min, ajan muutos on* $\Delta t = 5 - 1 = 4$ *min. Pitoisuuden muutos on* ΔC *= 550 - 400 = 150 ppm. Muutosnopeus on* $\frac{\Delta C}{\Delta t} = \frac{150ppm}{4} min$ *= 37,5 ppm/min. Tulos poikkeaa regressiosuoran kertoimesta. Tämä johtuu siitä, että regressiosuora on laskettu 0 - 5,8 min ajalta ja se käyttää 'oikeita' mittatuloksia, esimerkissä arvot on luettu kuvasta.*

Pitoisuuden muutosnopeuden perusteella voidaan laskea kaasun päästö, yhtälö 8.13.

$$q_x = a \cdot \frac{V_k}{V_m \cdot \frac{T_2}{T_1}} \cdot \frac{1}{A} \tag{8.13}$$

q_x	Kaasun x päästövirtaus
a	Pitoisuuden muutosnopeus
V_k	Kammion ja letkujen tilavuus
V_m	Ideallikaasun moolitilavuus $22{,}4 \cdot 10^{-3}$ m^3/mol (273 K)
T_1	Ilman lämpötila
T_2	Normilämpötila
A	Kammion pinta-ala

Päästömäärää laskettaessa pitoisuuden muutosnopeus pitää muuttaa massaperustaiseksi, se voidaan tehdä yhtälön avulla.

$$v_{CM} = v_{CV} \cdot \frac{M}{V_m} \tag{8.14}$$

v_{CM}	Kaasupitoisuuden massaperustainen muutosnopeus, $\frac{\Delta C_m}{\Delta t}$
v_{CV}	Kaasupitoisuuden tilavuusperustainen muutosnopeus, $\frac{\Delta C_V}{\Delta t}$
M	Kaasun moolimassa
V_m	Ideaalikaasun molitilavuus, yhtälö 1.2

Taulukossa 1.1 on tyypillisten päästökaasujen moolimassoja.

Hiilidioksidin muutosnopeus on 39 ppm/min. Mikä on sen massaperustainen muutosnopeus, kun mittauslämpötila on 20 ºC? Oletetaan mittausten aikaiseksi paineeksi normaali ilmanpaine. Lasketaan ensin ideaalikaasun moolitilavuus näissä olosuhteissa. Yhtälön 1.2 mukaan $V_m = \frac{8{,}314 \cdot 293{,}15}{101325} = 24{,}1$ *l/mol.* $v_{CM} = \frac{39}{1000000} \frac{44{,}0}{24{,}1} = 4{,}3$ *g/m³/h.*

Päästön laskua varten otetaan huomioon mittauskammion tilavuus ja pinta-ala, yhtälö 8.15.

$$E = v_{CM} \cdot \frac{V}{A} \tag{8.15}$$

v_{CM}	Kaasupitoisuuden massaperustainen muutosnopeus
V	Mittauskammion ja letkujen tilavuus
A	Kammion pinta-ala

Mikä on edellisen esimerkin päästömäärä, jos mittauskammion tilavuus on 3,7 l ja sen pinta-ala on 0,02 m²?
$E = 4{,}3 \frac{g}{m^3 \cdot h} \cdot \frac{3{,}7l}{0{,}02m^2} = 0{,}792g/(m^2 \cdot h) = 69{,}3$ *ton/ha7a (a=vuosi).*

Kammiomittaustulos on paikallinen arvo, se pätee n 1 m^2 pinta-alalle. Hehtaarissa on 10 000 m^2, jolloin tarvitaan runsaasti mittauspaikkoja, jotta saataisiin kattava tulos. Lisäksi kuvan 8.10 mukaisesti olosuhteet vaikuttavat erittäin voimakkaasti tuloksiin. Maa voi olla sulaa tai se on jäätynyt, se voi olla täysin kuivaa tai erittäin märkää. Tämä tietää mittauksissa runsasta hajontaa. Ravinnemäärät ja viljelytavat vaikuttavat myös päästöihin. Tutkimuksella on tämän takia runsaasti haasteita. Peltomaiden päästöjen yhteenvetoja voit löytää esimerkiksi hakusanoilla 'greenhouse gas emissions agriculture'.

Maaperän mittausinstrumenteista löydät tietoja netistä esimerkiksi hakusanoilla 'soil flux measurement'.

Kovarianssimenetelmä (Eddy Covariance)

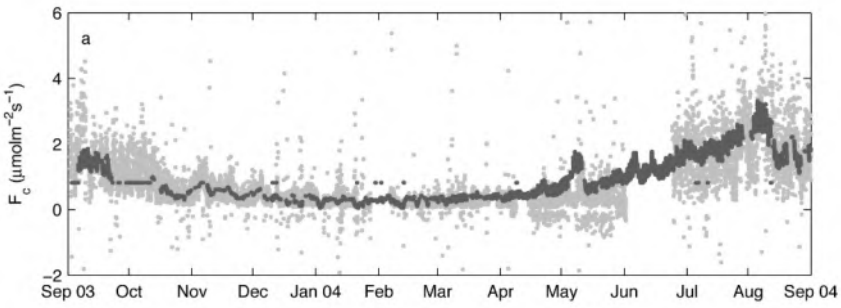
Kovarianssimenetelmästä käytetään myös nimeä pyörrekovarianssitekniikka tai sen englatilaista nimitystä eddy covariance method. Se perustuu tuulen aiheuttaman ilman pyörteilyyn, kuva 8.14. Mittausmasto on kuvan keskellä ja siinä on ilmanvirtaus- ja kaasupitoisuuksien anturit. Niillä mitataan ylöspäin ja alaspäin suuntautuvien pyörteiden nopeuksia ja kaasupitoisuuksia. Sen perusteella voidaan laskea ylöspäin ja alaspäin suuntautuvat kaasuvuot. Niiden erotus on joko päästö tai nielu.

Kovarianssimenetelmän etuna on se, että se mittaa päästön tai nielun laajalta alueelta. Mittaus ulottuu useiden satojen metrien alueelle ja jopa 10 ha alueelle [Kasvihuonekaasut ja niiden tulkinta]. Mittaus on nopea ja mittauksia voidaan tehdä jatkuvasti läpi vuoden, jolloin saadaan kattavaa tietoa päästöistä ja nieluista. Kuvassa 8.15 on esimerkki metsän hiilidioksidivuosta vuoden aikana.

Satelliitti ja droonimittaus

Satelliitti ja droonimittaukset tarjoavat mahdollisuuden mitata maaperän päästöjä. Sateelliittimittauksissa käytetään yleisesti spektrokopiaa ja infrapunamittauksia. Spektroskopiassa verrataan eri valon aallonpituuksien

Kuva 8.14: Kovarianssimenetelmät periaate, https://en.wikipedia.org/wiki/File:Py%C3%B6rrekovarianssitekniikan_kaaviokuva.jpg



Kuva 8.15: Esimerkki metsän hiilidioksivuosta vuoden aikana [Launiainen ym]

imeytymistä ja heijastumista. Sen perusteella voidaan määrittää kasvipeitteisyyttä, maan kosteutta, typen sitoutumista tai orgaanisen aineen määriä. Sillä voidaan arvioida myös hiilidioksidi- ja metaanipitoisuuksia. Infrapunamittauksissa käytetään infrapunan aaltoalueita, joilla pystytään tunnistamaan eri kaasuja. Satelliittikuvia voit katsoa esimerkiksi Copernicus ja Copernicus Land palveluista.

Droonimittauksissa voidaan käyttää antureita, jotka mittaavat suoraan esim. metaania, hiilidioksidia tai ammoniakkia. Ne voivat myös käyttää spektrometriaa tai infrapunatekniikkaa. Droonikartoitus tapahtuu sateellimittausta pienemmällä alalla, jolloin saadaan tarkempi paikkakohtainen tulos. Satelliitti tai droonimittaukset auttavat löytämään päästökohdat, jolloin maastomittauksilla voidaan tarkentaa päästöjä. Droonimittauksista löydät esimerkkejä YouTubesta ja tutkimustuloksia Google Scholar palvelusta.

8.5 Lämpövirta

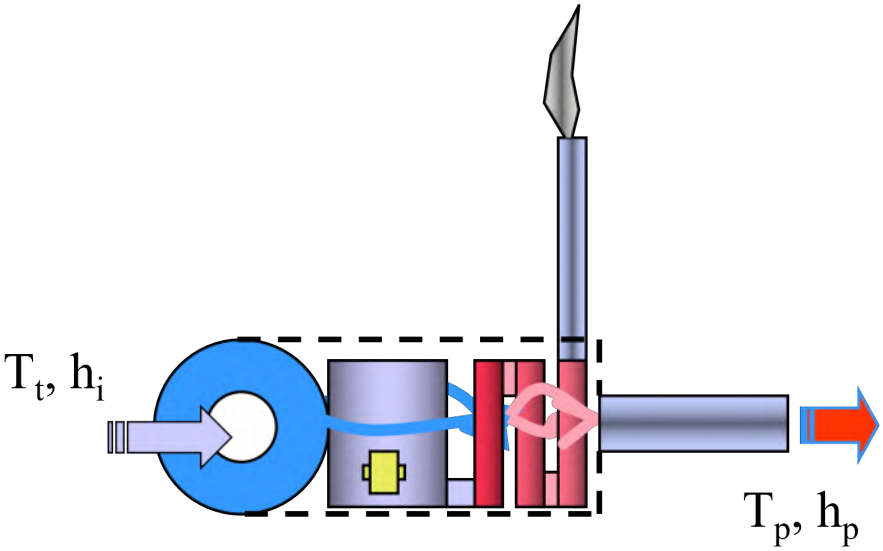
Lämpö voi siirtyä kolmella eri tavalla, johtumalla, konvektion tai säteilyn kautta. Johtumalla lämpö siirtyy rakenteita pitkin tai se voi siirtyä liikkumattomissa nesteissä tai kaasuissa ilman nesteen tai kaasun virtausta. Konvektiossa lämpö siirtyy neste- tai kaasuvirtauksen avulla virtauksen mukana. Konvektio voi olla vapaata tai pakotettua. Vapaassa konvektiossa lämpö aiheuttaa tiheyden muutoksen, joka aikaansaa nesteen tai kaasun virtauksen. Pakotetussa konvektiossa virtaus saadaan aikaa ulkoisin keinoin esim. pumpun tai puhaltimen avulla. Säteilyssä on säteilijä ja vastaanottaja. Siirtyminen näiden välillä tapahtuu aaltoliikkeenä. Esimerkiksi aurinko tai puun liekki lähettää lämpösäteitä. Kun lämpösäteet kohtaavat läpäisemättömän pinnan, osa säteilystä heijastuu ja osa muuttuu jälleen lämmöksi.

Rakenteiden läpi kulkeva lämpövuo voidaan mitata lämpövirtalevyillä (heat flux sensor). Nämä anturit tehdään ohuina liuskoina tai nappeina, jotka voidaan kiinnittää rakenteen pintaan, kuva 8.16. Tyypillisesti anturi on tehty sarjaan kytketystä termoelementtilangoista (thermopile), jotka antavat lämpövuosta riippuvan jänniteviestin. Anturin mukana tulee ohjeet ja kalibrointitodistukset siitä, miten jännite muutetaan lämpövuoksi (W/m^2). Anturit voivat mitata kaikkia lämmönsiirtymismuotoja. Lisätietoja käytöstä ja sovelluksista esimerkiksi valmistajan Hukseflux sivuilta.

Kuva 8.16: Lasin U-arvon mittaus lämpövuoanturilla, https://en.wikipedia.org/wiki/Heat_flux_sensor

8.6 Lämmitystehon mittaus

Tässä tarkastellaan fluidin (neste tai kaasu) avulla tapahtuvaa lämmön pakotettua konvektiota eli kuinka ilmauuneissa ja vesiuuneissa teho mitataan. Ilmauuneja käytetään kuivureissa ja vesiuuneja keskuslämmityksessä. Samat periaatteet pätevät, jos mitataan yksittäiset radioaattorin toimintaa. Uuneissa fluidi lämmitetään alemmasta lämpötilasta ylempään ja radiaattoreissa tapahtuu päinvastoin, se luovuttaa lämpöä. Kuvassa 8.17 ilmauuni nostaa ilman lämpötilan imulämpötilasta T_i lämpötilaan T_p. Jos tarkastellaan entalpiaa (lämpösisältöä), se lisääntyy ilmaan tuodun lämmön ansiosta. Uunissa ei tapahdu ilman kosteussuhteen muutosta (absoluuttinen kosteus). Suhteellinen kosteus kuitenkin muuttuu, koska lämmennyt ilma pystyy sitomaan lisää vettä. Koska kosteussuhde ei muutu, uunin antama lämpöteho voidaan laskea ilman ominaislämpökapasiteetin avulla, yhtälö 8.16.



Kuva 8.17: Lämminilmakuivurin uuni

$$P_l = q_v \cdot r \cdot c \cdot \Delta T \tag{8.16}$$

P_l	Lämmitysteho
q_v	Fluidin tilavuusvirtaus
r	Fluidin tiheys
c	Fluidin ominaislämpökapasiteetti
ΔT	Lämpötilaero

Yhtälö pätee myös vesikattilalle ja radioaattorille. Ilma ominaislämpökapasiteetti on 1,005 kJ/(kg·K) ja veden 4,18 kJ/(kg·K). Lämpötila vaikuttaa hieman näiden ominaislämpökapasiteetteihin, mutta siitä johtuva virhe normaalilla lämpötila-alueella on vähäinen. Ilman tiheys voidaan laskea yhtälön 2.1 avulla ja veden tiheys voidaan laskea yhtälön 8.6 avulla. Usein veden tiheydelle voidaan käyttää arvoa 1000 kg/m^3.

$$r_v = 999,84847 + 0,06337563 \cdot T - 0,008523829 \cdot T + 0,00006943248 \cdot T - 0,0000003821216 \cdot T^4 \tag{8.17}$$

r_v [kg/m^3]	Veden tiheys välillä 0 - 100 ºC
T	Lämpötila ºC

Kuivuriuunin imuilman lämpötila on 8 ºC ja puhallusilman 75 ºC. Ennen uunia mitattu tilavuusvirtaus on 22000 m^3/h. Mikä on uunin lämpöteho?
Lasketaan ensin ilman tiheys ennen uunia, $r_i = \frac{101300Pa \cdot 28,97kg/kmol}{8,31\frac{J}{mol \cdot K} \cdot 281,15K} =$ 1,26 kg/m^3. Yhtälöm termi $q_v \cdot r$ on itse asiassa ilman massavirtaus, sille osalla saadaan $q_{mi} = q_v \cdot r_i 22000m^3/h \cdot 1,26kg/m^3 =$ 27619 kg/h. Uunissa ilman tiheys muuttuu ja tilavuusvirtaus kasvaa, mutta massavirtaus pysyy samana. Lasketaan uunin lämpöteho $P_l = 27619kg/h \cdot 1,005kJ/(kg \cdot K) \cdot (75 - 8)K =$ 517 kW.

Kuivausilma lämmitetään vesiradiaattorin kautta. Mikä on radioaattorin antama lämpöteho, kun tulevan veden lämpötila on 90 ºC ja poistuvan 65 ºC. Veden virtausnopeus on 100 l/min.
$P_l = 100l/min \cdot 1000kg/m^3 \cdot 4,18\frac{kJ}{kg \cdot K} \cdot (90 - 65)K =$ 174 kW

8.7 Kuivausmittaukset

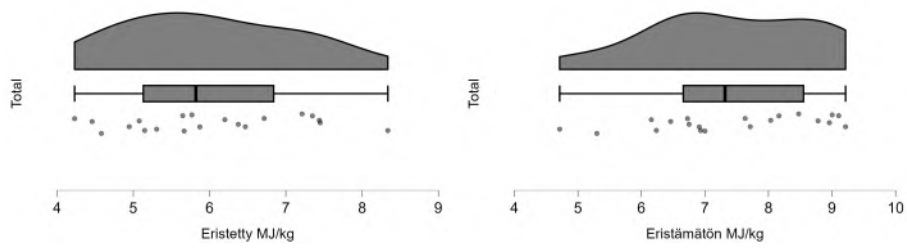
Vilja ja kuivaheinä tarvitsevat kuivauksen, jotta ne säilyisivät varastoituna ja hyvälaatuisena pidemmän aikaa. Mittaamista tarvitaan kuivausprosessien ohjaukseen ja myös kuivauksen kehittämiseen. Mittaamisessa on useita epävarmuustekijöitä, kuten sää, viljan laatu ja ominaisuudet, viljan roskaisuus sekä puhaltimen toiminta. Sää vaikuttaa siihen mikä on imuilman lämpötila ja kosteus. Syksyisin liikutaan 0 - 15 ºC lämpötiloissa ja kosteus on 60 - 100 %. Imuilman lisäksi sää vaikuttaa kuivurin lämpöhäviöihin, kylmä ilma ja tuuli lisäävät lämpöhäviöitä. Viljalajikkeet kuivuvat eri tavalla ja viljan kunto ja kosteus vaikuttavat kuivumiseen. Kostea ja huonolaatuinen vilja juoksee ja pakkaantuu erilailla kuin hyvälaatuinen ja kuiva. Kuivurin ja viljan aiheuttama vastapaine vaikuttaa myös puhaltimen toimintaan. Näistä tekijöistä johtuen kuivauskokeiden tuloksissa on usein runsaasti hajontaa.

Laboratoriokuivureissa kuivattavana materiaalina on käytetty kostutettua viljaa. Samaa viljaa käytetään uudestaan kostuttamalla se haluttuun kosteuteen. Vesi sumutetaan esimerkiksi elevaattorissa viljan joukkoon ja kahden - kolmen vuorokauden kierrätyksen jälkeen jyvät ovat kostuneet kauttaaltaan ja kuivauskoe voidaan uusia. Tällä poistetaan viljan laadusta aiheutuvia hajontoja.

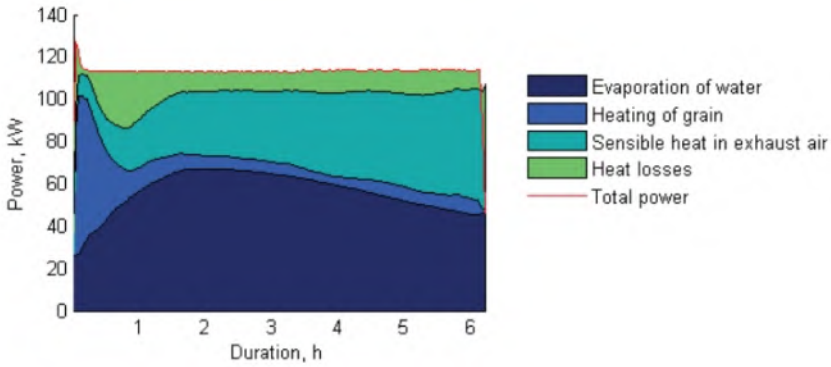
Viljankuivauksesta löytyy laajempi Hautala ym [Hautala ym] kirjoittama raportti sekä viljelijöille tarkoitettu Ahokkaan ja Jokiniemen opas [Ahokas ja Jokiniemi].

Kuvassa 8.18 on laaja koesarja kuivurin eristämisen vaikutuksesta energiankulutukseen. Eristetyn kuivurin ominaiskuluksen keskiarvo on 6,0 MJ/kg ja eristämättömän 7,4 MJ/kg [Jokiniemi 2016]. Mittaustulosten hajonta on kuitenkin ollut suuri. Hajonnan muodosta (kuvan ylin kaavio) näkyy kuitenkin, että eristetyn koesarjan tulokset ovat keskittyneet enemmän pienemmän kulutuksen arvoille. Tälläinen hajonta on tyypillistä kuivauskokeille olosuhteiden ja kuivattavan materiaalin muutosten takia.

Kuvassa on 8.19 esimerkki kuivauksen tehon jakaantumisesta kuivausprosessin aikana. Kokonaisteho on ollut 115 kW tasolla. Alussa viljamassan lämpeneminen syö suuren osan tehosta. Kahden tunnin kohdalla veden haihtuminen on suurimmillaan. Tämän jälkeen poistoilman mukana kulkeutuva lämpö lisääntyy, koska kosteuden poistuminen hidastuu. [Jokiniemi 2016]



Kuva 8.18: Kuivurin eristämisen vaikutus energian ominaiskulutukseen [Jokiniemi 2016]



Kuva 8.19: Kuivaustehon jakautuminen kuivauksen aikana, Evaporation of water = veden haihduttamiseen kuluva teho, Heating of grain = viljan lämpenemiseen kuluva teho, Sensible heat in exhaust air = poistoilman mukana poistuva lämpöteho ja Heat losses = kuivurin lämpöhäviöt. [Jokiniemi 2016]

8.7.1 Ilmamäärän mittaaminen

Kuvassa 8.20 on esimerkki keskipakoispuhaltimen ilmamäärästä vastapaineen funktiona. Vastapaineen lisääntyessä ilmamäärä pienenee. Potkuripuhaltimilla ilmamäärä vähenee voimakkaammin kuin keskipakoispuhaltimilla. Vastapaineen saa aikaiseksi kuivurissa oleva vilja.

Kuivurissa on aina ilmavuotoja, mikä tuottaa virhettä veden poistumisnopeuden mittaamiseen. Ylipainekuivureissa osa kuivausilmasta poistuu yläsiilon ja elevaattorin kautta, jolloin kuivurin ilman poistoputken virtaus on pienempi kuin tuloputken virtaus. Tällöin ilman virtauksen mittaaminen tuloputkesta antaa hieman todemman tuloksen, koska osa kosteudesta poistuu vuotoina. Alipainekuivurissa tilanne on päinvastainen, poistoputken virtaus on suurempi kuin tuloputken virtaus. Vuodot lisäävät ilmamäärää ja poistoputken virtaus antaa todemman kuvan. Kuvassa 8.21 on esimerkki pienen laboratoriokuivurin ilman massavirroista. Kooltaan tämä kuivurirakenne ei vastaa isoja kuivureita. Kuvasta näkyy, että ilmamäärät ovat alussa olleet hieman korkeampia ja kuivauksen edetessä ne ovat pienentyneet. Syynä tähän voi olla esimerkiksi kuivurin vastapaineen muutos, joka näkyy puhaltimen ilmamäärän muutoksena.

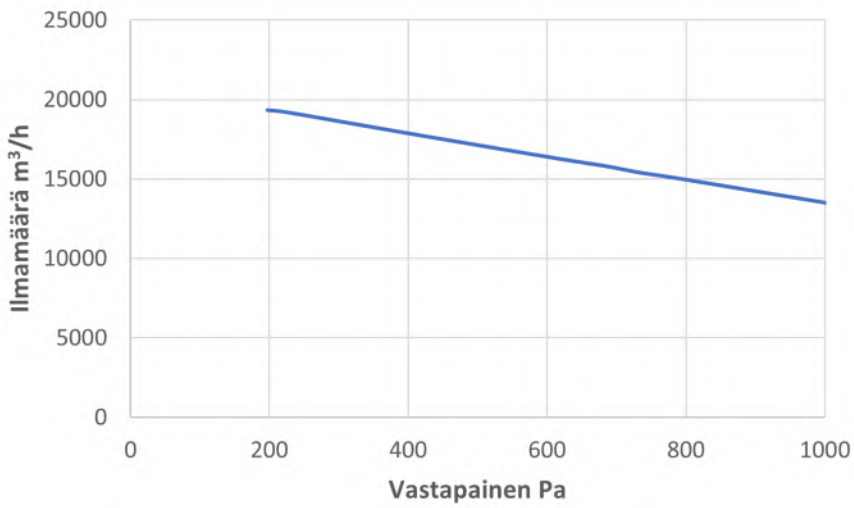
Ilmamäärä voidaan mitata putkistosta joko tietyin aikavälein pitot-putkella tai putkistoon voidaan asentaa keskiarvopitotputken periaatteella toimiva laite, jolloin mittaus voidaan tehdä myös jatkuvana, katso kappale 5.5.1. Mittauspaikka pitää valita ohjeiden mukaan eli siinä on oltava riittävä suora putkiosuus ennen ja jälkeen mittauksen.

8.7.2 Kosteuden poistumisnopeus

Materiaalin kosteus (vesipitoisuus) ilmoitetaan veden osuutena joko kuivan materiaalin massasta tai märän materiaalin massasta. Meillä käytetään lähes yksinomaan vertailukohtana märän materiaalin määrää. Ulkomaisissa ja etenkin anglosaksisissa tutkimuksissa käytetään melko paljon vertailukohtana kuivan materiaalin määrää. Se on järkevin tapa ilmoittaa kosteuspitoisuus erilaisissa prosesseissa, koska kuivan viljan määrä säilyy samana läpi koko prosessin, mutta märän viljan määrä vaihtelee jatkuvasti. Laskentaperusta ilmoitetaan niissä kirjaimilla wb = wet basis = märkäkosteus ja db = dry basis = kuiva kosteus.

Märkäkosteus w saadaan punnitsemalla näyte-erä, kuivaamalla se ja vertaamalla painon vähennystä (veden haihtumista) alkuperäiseen painoon:

$$w = \frac{M_{vesi}}{M_{koko}} \tag{8.18}$$



Kuva 8.20: Keskipakoispuhaltimen ilmamäärä vastapaineen muuttuessa

w	materiaalin kosteus (märkä, wb)
M_{vesi}	materiaalissa (näyte-erässä) olevan veden massa
M_{koko}	materiaalin (näyte-erän) kokonaismassa

Poistettava vesimäärä voidaan laskea viljan alkukosteuden ja viljamäärän perusteella. Viljamääärät ja sadot ilmoitetaan varastointikosteuden mukaan eli viljoilla 14 % kosteuden mukaan ja kosteusprosenttina käytetään märkäkosteutta eli vesimäärä ilmoitetaan erän kokonaispainon (kuiva-aines + vesi) mukaan. Viljassa oleva vesimäärä M_{vesi} ja kuiva-aineksen määrä M_{kuiva} saadaan viljerän kokonaismäärästä M_{koko}, kun kosteuspitoisuus on w seuraavasti.

$$M_{vesi} = w \cdot M_{koko} \tag{8.19}$$

$$M_{kuiva} = (1 - w) \cdot M_{koko} \tag{8.20}$$

Yleensä tunnetaan erän tai hehtaarisadon määrä varastointikosteudessa sekä korjuu- ja varastointikosteudet. Poistettu vesimäärä voidaan laskea määrittämällä ensin varastointikosteudessa oleva kuiva-aineksen määrä. Tämä kuiva-ainesmäärä säilyy samana kosteuspitoisuuden muuttuessa, vain vesimäärä muuttuu kosteuden muuttuessa. Puintikosteudessa viljassa oleva vesimäärä $M_{vkorjuu}$ saadaan seuraavasti, kun korjuukosteus on w_{korjuu}.

$$M_{vkorjuu} = \frac{w_{korjuu} \cdot M_{kuiva}}{1 - w_{korjuu}} \tag{8.21}$$

Poistettava vesimäärä saadaan nyt korjuu- ja varastointikosteuksien vesimäärien erotuksesta.

Monasti tälläiset laskelmat on helpompi tehdä kun kosteus ilmoitetaan kuiva-ainekiloa kohti. Tämän etuna on se, ettei laskentaperusta jatkuvasti muutu, vaan se säilyy samana. Kuivakosteus w_k saadaan märkäkosteudesta w yhtälöllä:

$$w_k = \frac{w}{1 - w} \tag{8.22}$$

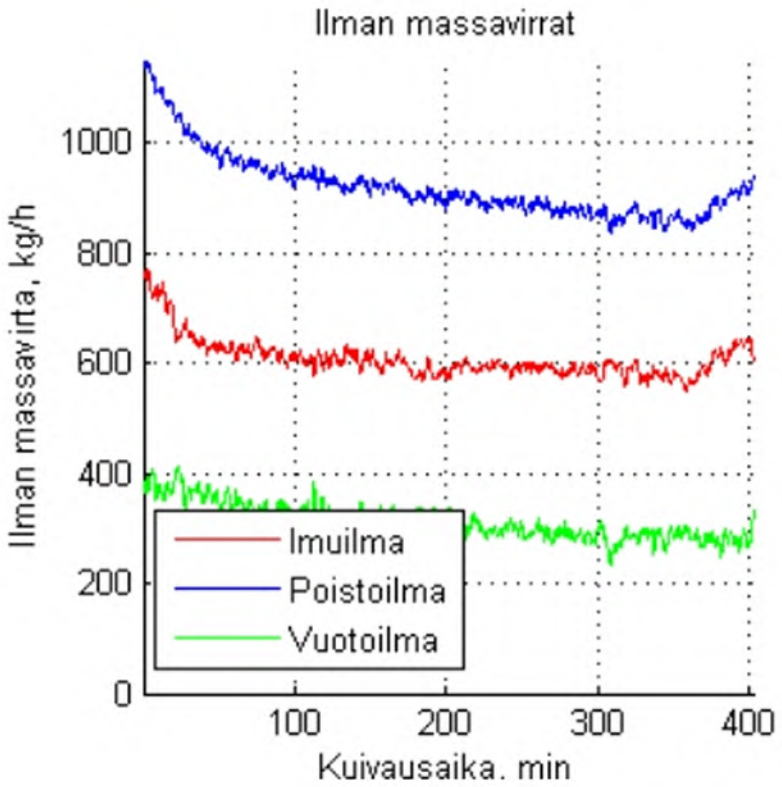
Vastaavasti märkäkosteus saadaan kuivakosteudesta seuraavasti:

$$w = \frac{w_k}{1 + w} \tag{8.23}$$

Poistettava vesimäärä saadaan kuivakosteuksia (db) käytettäessä, kun korjuukosteus on w_k ja varastointikosteus on w_v, muodossa:

$$M_{vpoisto} = (w_k - w_v) \cdot M_{kuiva} \tag{8.24}$$

Jos käytetään märkäkosteuksia, poistettavalle vesimäärälle voidaan johtaa yhtälö 8.25. Yhtälössä sato on ilmoitettu kuivattuna satona (kosteus w_l) ja kosteudet ovat märkäperusteisia.



Kuva 8.21: Kuivurin tulo- ja poistoputkien ilmavirrat alipainekuivurissa

$$M_{vpoisto} = M_{sato}\frac{w_a - w_l}{1 - w_a} \tag{8.25}$$

Vastaavasti, jos sato ilmoitetaan puintikosteudessa (w_a), saadaan poistettavalle vesimäärälle yhtälö:

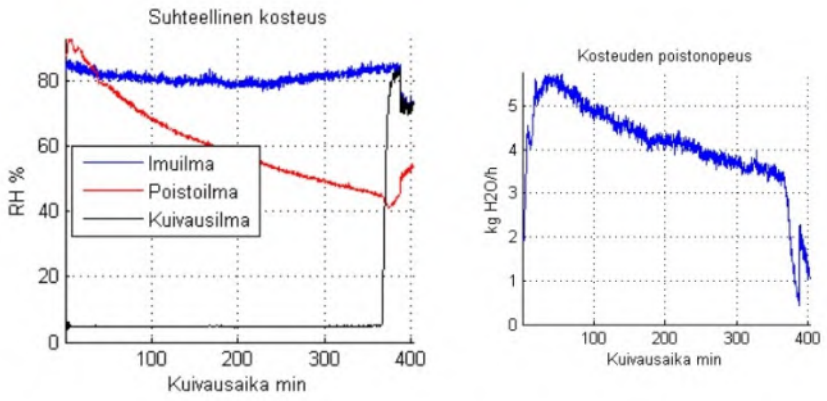
$$M_{vpoisto} = M_{puinti}\frac{w_a - w_l}{1 - w_l} \tag{8.26}$$

Esimerkki. *Viljasato on 4000 kg/ha varastointikosteudessa 14 % (wb). Puintikosteus oli 22 % (wb). Kuinka paljon öljyä tarvitaan kuivaamiseen, jos kuivauksessa tarvitaan 100 g kevyttä polttoöljyä yhden vesikilon poistamiseen ? Kuinka kauan kuivuminen kestää, jos veden haihtumisnopeus on 146 kg/h ?*

Varastointikosteudessa yhden hehtaarin sadossa on vettä 0,14·4000 = 560 kg ja kuiva-ainetta 4000 - 560 = 3440 kg. Puintikosteudessa hehtaarisadossa oli vettä yhtälön 8.21 mukaisesti $\frac{0{,}22\cdot 3440}{1-0{,}22}$ *= 970 kg ja hehtaarisato märkänä oli 3440 + 970 = 4410 kg. (Satohan ilmoitetaan varastointikosteudessa. Laskussa on lähdetty tästä.) Kuivauksessa vettä poistui 970 - 560 = 410 kg. Vedenpoistoon tarvitaan 410·100 = 41,0 kg kevyttä polttoöljyä. Jos polttoaineen tiheys on 830 g/l, tarvitaan 49 l öljyä. Veden poistumisnopeus on 146 kg/h, jolloin 410 kg haihduttaminen kestää* $\frac{410}{146}$ *= 2,8 h. Kun polttoöljyn energiasisältö on 42,9 MJ/kg, kuivaamisen aikainen polttoaineteho on* $\frac{41\cdot 42{,}9}{2{,}8}$ *= 174,5 kW. Veden poiston lisäksi energiaan tarvitaan viljamassan lämmittämiseen kuivauslämpötilaan.*

Viljassa olevan veden poistumisnopeus voidaan mitata kahdella tavalla. Kuivuri voi olla asennettu vaaka-antureiden päälle, jolloin veden poistumista voidaan seurata painon muutoksena. Toisena vaihtoehtona on mitata kuivuriin tulevan ilman ja siitä poistuvan ilman kosteus. Sen ja ilmamäärän avulla voidaan laskea poistuva kosteus.

Jyvissä oleva kosteus siirtyy kuivausilmaan, joka siirtää veden kuivurista pois. Periaatteessa mitä suurempi ilmamäärä on, sitä nopeammin kosteus siirtyy kuivurista pois. Rajana on jyvien kulkeutuminen ilman mukana. Jyvät lähtevät liikkeelle kun ilman nopeus on luokkaa 7-10 m/s. Veden poistumisnopeus voidaan laskea ilman sisältämän vesimäärän mukaan. Jos esimerkiksi kuivausilman kosteussuhde on 0,008 kg vettä kuivaa ilmakiloa kohden ja kuivurista poistuvan ilman vastaava arvo on 0,023, jokaista ilmakiloa kohden vesimäärä on lisääntynyt 0,023 - 0,008 = 0,015 kg. Veden poistumisnopeus saadaan laskettua yhtälön 8.27 mukaan. Yhtälössä q_m on ilman massavirtaus ja Δx on ilman sitoma lisävesimäärä.



Kuva 8.22: Imu-, kuivaus- ja poistoilman kosteudet kuivauksen aikana ja kosteuden poistumisnopeus

$$q_{H2O} = q_m \cdot \Delta x \tag{8.27}$$

q_{H2O}	Veden poistumisnopeus
q_m	Kuivausilman massavirtaus
Δx	Kuivausilman sitoma vesimäärä

Esimerkki. *Ilman massavirtaus on 4,44 kg/s (13 000 m^3/h) , tuloilman kosteussuhde on 0,008 kg/kg ilma ja poistoilman 0,023 kg/kg/ilma. Mikä on veden poistumisnopeus?*
Poistumisnopeus on q_{H2O}= 4,44·0,015 = 0,067 kg/s = 240 kg/h.

Kuivauksen alussa veden poistuminen on nopeaa, jyvistä lähtee pinnalla oleva helposti irtoava vesi ensin. Kuivauksen loppuvaiheessa poistumisnopeus pienenee, koska veden siirtyminen jyvän sisästä pintaan hidastaa veden poistumista jyvästä, kuva 8.22. Käytettäessä tavanomaista kuivauslämpötilaa (65 - 70 ºC) kuivauksen alussa poistoilman kosteus on 90 - 100% ja poistolämpötila on 5 - 10 ºC imuilmaa korkeampi. Kuivaus lopetetaan normaalisti kun poistoilman lämpötila on 35 - 40 ºC. Poistoilman kosteus on tällöin 40% luokkaa.

Koska veden siirtyminen jyvästä muuttuu kuivauksen aikana, myös kuivausnopeus muuttuu kuivauksen aikana. Kuvassa 8.23on esitetty kuivauksen kulku Mollier diagrammissa. Kuivauksen alkuvaiheessa poistoilma on pisteen 3 mukaisessa tilassa ja kuivauksen edistyessa poistoilma lämpenee ja kuivuu (pisteet 4 ja 5). Kuvan esimerkki on todellisesta kuivurista ja sen lämpöhäviöt näkyvät siinä ettei prosessi ole adiabaattinen vaan kuivurisiilon lämpimät pinnat aiheuttavat lämpöhäviöitä. Uunin jälkeen ilman entalpia on 84 kJ/kg ja pisteessä 3 poistoilmassa se on 61 kJ/kg.

Mittaamista varten tarvitaan lämpötilan ja kosteuden mittaus ennen ja jälkeen kuivurin. Tämä pitää tehdä putkiston suoralta osuudelta siten, että ennen ja jälkeen mittauspaikan on saman verran suoraa putken osuutta kuin virtausmittauksessa vaaditaan. Kuivuriputkistoissa virtaus on turbulenttista, josta johtuen lämpötila suoran putken osuudella on melko tasainen. Kuvassa 8.24 on esimerkki miten lämpötila muuttuu turbulenttisessä virtauksessa putken keskeltä reunaan siirrytteässä. Lämpötilojen mittaustulokset rekisteröidään tavallisesti mittalaitteiden muistiin. Haluttaessa voidaan käyttää poikkileikkauksessa useampaa mittapistettä. Virtausnopeuden profiili on samanlainen lämpötilaprofiilin kanssa. Jos mittaus tehdään esimerkiksi putkimutkaa ennen tai jälkeen, niissä lämpötilaprofiilit ovat erilaiset, koska ilma lajittuu keskipakoisvoiman ja ilman tiheyden vaikutuksesta mutkassa.

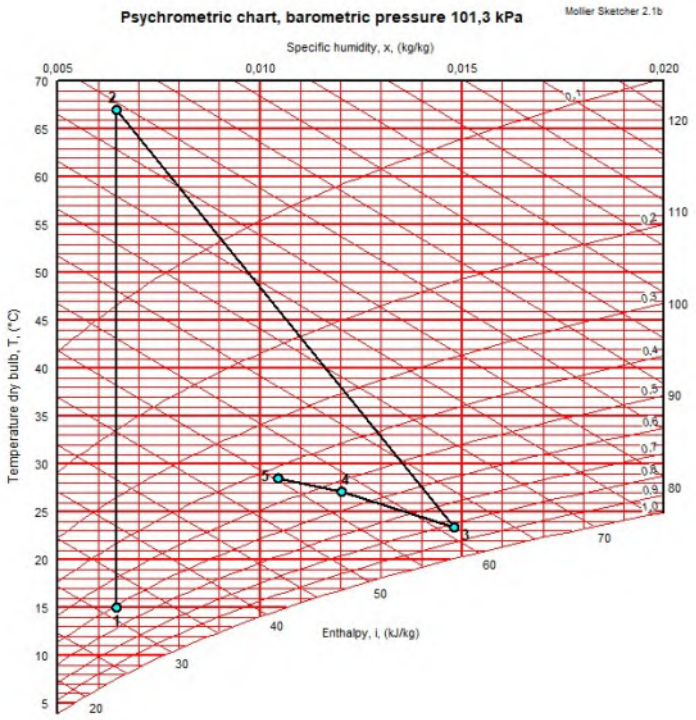
Kosteuden mittapisteet voidaan valita samalla tavalla kuin lämpötilan mittapisteet. Kosteusantureiden osalta niiden suojaus kannattaa varmistaa. Ilmavirrassa on epäpuhtauksia, jotka voivat vahingoittaa kosteusantureita tai tarttua niiden pintaan, jolloin mittaustuloksiin tulee muutoksia.

Kosteussuhde lasketaan ilman suhteellisesta kosteudesta seuraavasti:

1. Lasketaan mikä on ilman kastepistettä vastaava vesihöyryn osapaine p_k yhtälön 2.5 avulla. Siinä lämpötila T on ilman lämpötila.

2. Lasketaan mikä on ilman vesihöyryn osapaine mitatun kosteuspitoisuuden avulla ratkaisemalla yhtälöstä 2.3 osapaine p_v. $p_v = \frac{RH}{100_k} \cdot p_k$

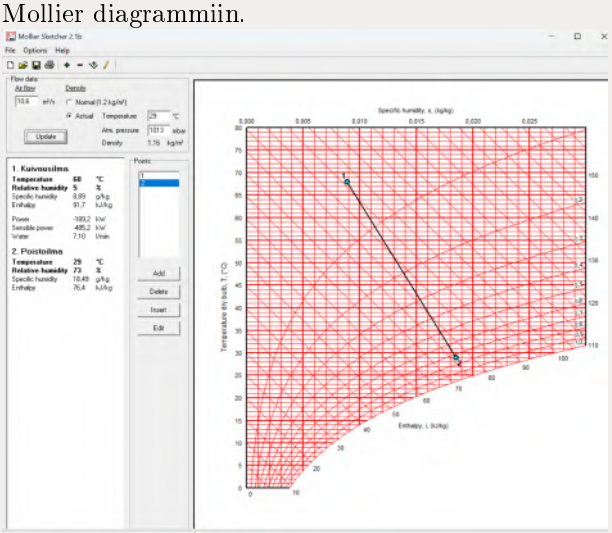
3. Lasketaan kosteussuhde yhtälön 2.2 avulla.

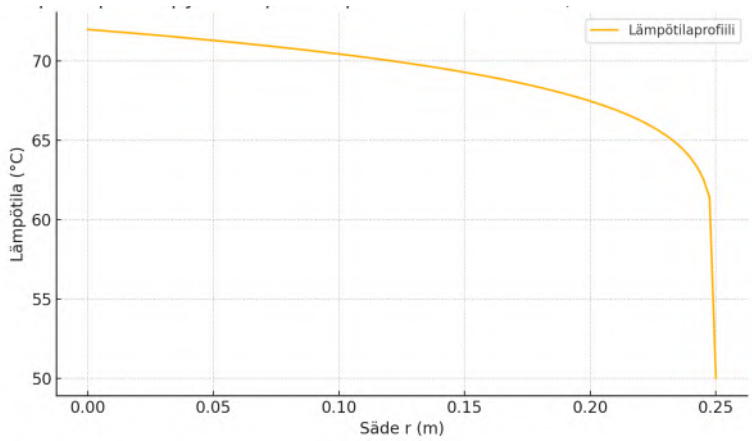


Kuva 8.23: Kuivauksen kulku

Ilman virtausnopeus tarvitaan massavirtauksena, mittaus tehdään tavanomaisesti tilavuusvirtauksena. Ilman tiheys saadaan laskettua yhtälön 2.1 avulla ja massavirtaus saadaan kertomalla tilavuusvirtaus tiehydellä.

Esimerkki. Alipainekuivurin kuivausilman lämpötila on 68 °C ja suhteellinen kosteus on 5%. Poistoilman lämpötila on 29 °C, kosteus on 72 % ja ilman virtaus on 38 000 m3/h. Mikä on kosteuden poistumisnopeus? Ilman paine on normaalipaine 101315 Pa.
Lasketaan kuivausilman arvot ensin. Kuivausilman kastepisteen vesihöyryn osapaine on $p_{kas} = \frac{e^{77,34+0,0057\cdot(68+273)-\frac{7235}{68+273}}}{(68+273)^{8,2}} = 28290$ Pa. Mitatun suhteellisen kosteuden mukaan kuivausilman vesihöyryn osapaine on $p_v = 0,05 \cdot 28290$ =1414 Pa ja sen kosteussuhde on $x = \frac{1414}{1,6\cdot(101315-1414)} = 8,8\ \frac{gH_2O}{kgilma}$. Vastaavat luvut poistoilmalle ovat p_{kas}= 3994 Pa, p_v= 2876 Pa ja x=18,2 $\frac{gH_2O}{kgilma}$. Ilmamäärä on mitattu poistoilmasta, lasketaan ilman tiheys $r = 1,23 \cdot \frac{101315}{101315} \cdot \frac{288}{43+273} = 1{,}12$ kg/m^3. Ilman massavirtaus on $q_m = 38000 \cdot 1,12$= 42460 kg/h. Ilma sitoo viljasta vettä $18,2 - 8,8 = 9{,}3\ \frac{gH_2O}{kgilma}$. Veden poistumisnopeus on $q_{H_2O} = 9,3 \cdot 42460$= 414 kg/h. Laskennassa voidaan käyttää myös Mollier Sketcher ohjelmaa, joka laskee tilapisteet ja piirtää prosessin pisteet Mollier diagrammiin.





Kuva 8.24: ChatGPT:n avulla tuotettu arvioitu lämpötilaprofiili turbulenttisessa ilmavirtauksessa 0,5 m putkessa (virtausnopeus 30 m/s, T = 70 °C). Nollakohta on putken keskikohta.

8.7.3 Kuivurin energiankulutus

Kuivurin energiankulutus kannattaa ilmoittaa haihdutettua vesikiloa kohden, koska silloin suurin kulutukseen vaikuttava tekijä vilja, sen kosteus ja määrä on otettu huomioon. Lämminilmakuivaus kuluttaa normaalisti energiaa 1,4 - 2,0 kWh haihdutettua vesikiloa kohden. Poistettava vesimäärä M_{vpois} voidaan laskea yhtälön 8.25 tai 8.26 avulla, jolloin kuivauksen energian kulutus E_k saadaan, kun kuivauksen energian kulutus on q_{om} seuraavasti:

$$E_k = M_{vpois} \cdot q_{om} \tag{8.28}$$

Polttoaineen kulutus q_{pa} saadaan, kun polttoaineen lämpöarvo on H_{pa}:

$$q_{pa} = \frac{E_k}{H_p} \tag{8.29}$$

Öljyssä on energiaa 10,0 kWh/l ja hyötysuhde on 90% paikkeilla, jolloin yhdestä öljylitrasta saadaan lämpönä 9,0 kWh. Puun ja yleensä biopolttoaineiden osalta tilanne on hieman erilainen, koska niissä on vettä, mikä vähentää sen lämpösisältöä. Biopolttoaineen lämpösisältö H_a on, kun w on sen kosteus ja H_{ak} on täysin kuivan (0% kosteus) polttoaineen lämpöarvo(MJ/kg):

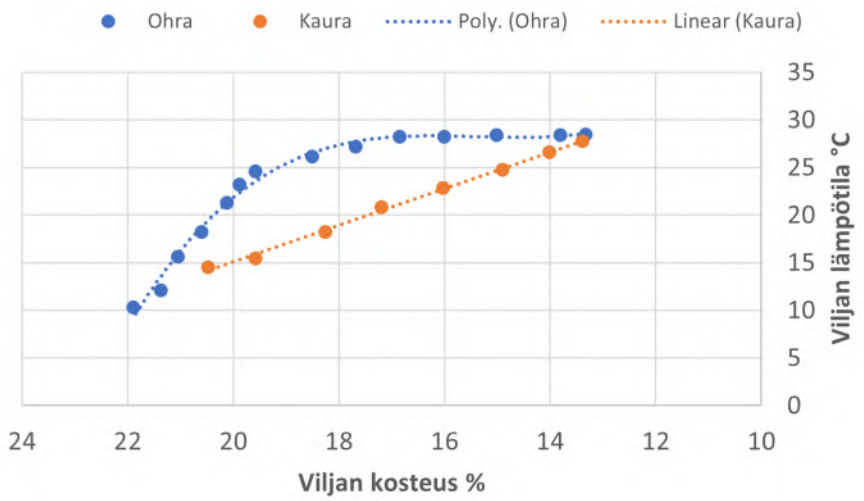
$$H_a = H_{ak}(1 - w) - 2,443 \cdot w \tag{8.30}$$

Puun kuiva-aineen lämpöarvo on 19 MJ/kg, turpeen 20 MJ/kg ja viljan 20 MJ/kg. Yhtälö 8.30 antaa lämpöarvon yksikkönä MJ/kg. Jos halutaan muuttaa se yksiköksi kWh/kg, luku pitää jakaa arvolla 3,6 (1 kWh = 3,6 MJ). Biopolttainemääriä ei yleensä punnita vaan ne myydään kuutioina. Tällöin kun kilogrammat muutetaan moteiksi, pitää tietää myös sen tilavuuspaino. Esimerkiksi hakkeella hakekoko vaikuttaa tilavuuspainoon.

Esimerkki. *Viljan puintikosteus on 24% (wb) ja se kuivataan 14% kosteuteen. Erän koko on 36 tonnia. Kuinka paljon energiaa tarvitaan erän kuivaukseen?*

Lasketaan ensin poistettava vesimäärä yhtälön 8.26 $M_{vpoisto} = 36000\frac{0,24-0,14}{1-0,14}$ *= 4186 kg. Kuivuri kuluttaa normaalisti 1,5 - 2,0 kWh energiaa haihdutettua vesikiloa kohti. Käytetään laskuissa 1,7 kWh arvoa. Energian tarve on* $E_k = 4186 \cdot 1,7$ *= 7116 kWh. Polttoöljyn lämpöarvo on n 43 MJ/kg ja tiheys 0,83 kg/l. Tämän perusteella yhdessä litrassa on n 10 kWh energiaa. Uunin hyötysuhteeksi voidaan ottaa 90%, jolloin yhdellä litralla saadaan 9 kWh lämpöenergia ja polttoöljyä tarvitaan* $q_{pa} = \frac{7116}{9}$ *= 791 l. Jos käytetään hakeuunia, hakkeen lämpöarvo riippuu sen kosteudesta. Käytetään suhteellisen kuivaa haketta, jonka lämpöarvo on 13 MJ/kg eli 3,6 kWh/kg. Hakkeen tilavuuspaino vaihtelee 200 - 400 kg/m*^{3}*. Lasketaan 300 kg/m*^{3} *arvolla, yhden kuutiometrin energiasisältö on* $300 \cdot 3,6$ *= 1080 kWh/m*^{3}*. Hakelämmityksen hyötysuhteena voidaan käyttää 80%, jolloin motista haketta saadaan* $0,8 \cdot 1080$*= 864 kWh/m*^{3}*. Haketta tarvitaan* $q_{pa} = \frac{7116}{864}$ *= 8,2 m*^{3}*.*

Aikoinaan energian kulutus ilmoitettiin öljylitroina haihdutettua vesikiloa kohden. Tällöin mukana on myös uunin hyötysuhde. Nykyisin käytetään paljon hakeuuneja, jonka polttoaineen kulutuksissa on runsaasti eroja, johtuen lähinnä hakkeen kosteudesta ja laadusta. Parempi tapa energian kulutuksen mittaamiseen on mitata lämmönlähteen tuottama energia kappaleen 8.6 mukaisesti.



Kuva 8.25: Viljan lämpeneminen kuivauksen aikana

Esimerkki. *Kuivuriuunin antoi 6,6 h erän aikana keskimäärin 280 kW tehon, mikä oli kuivauksen energiankulutus? Energiankulutus saadaan tehon ja ajan tulona,* $280 \cdot 6,6 = 1848$ *kWh.*

Kuivurikoneikon lämpöhäviö voidaan laskea kuivausilman ja poistoilman ominaisentalpioiden avulla, yhtälö 8.31.

$$P_{häviö} = q_m \cdot (h_k - h_p) \tag{8.31}$$

$P_{häviö}$	Häviöteho
q_m	Kuivausilman massavirtaus
h_k	Kuivausilman ominaisentalpia
h_p	Poistoilman ominaisentalpia

Esimerkki. Aiemmassa laskussa kuivausilman lämpötila oli 68 °C ja suhteellinen kosteus on 5%. Poistoilman lämpötila on 29 °C, kosteus on 72 % ja ilman massavirtaus oli 42460 kg/h. Mollier Sketcher antoi kuivausilman ominaisentalpiaksi 91,7 kJ/kg ja poistoilman 75,7 kJ/kg. Lämpöhäviö on silloin $P_{häviö} = \frac{42460kg}{3600s} \cdot (91,7 - 75,7) \frac{kJ}{kg}$ = 189 kW

8.7.4 Kuivauksen hyötysuhde

Kuivauksen energiatehokkuus voidaan ilmoittaa kahdella eri tavalla. Meillä käytetään yleisesti tapaa, jossa ilmoitetaan kuinka paljon energiaa tarvitaan yhden vesikilon poistamiseen. Tätä kutsutaan ominaisenergian kulutukseksi. Toisena vaihtoehtona on verrata energian kulutusta vastaavassa tilanteessa tarvittavaan veden höyrystymiseen kuluvaan energiaan. Tällöin puhutaan kuivurin hyötysuhteesta.

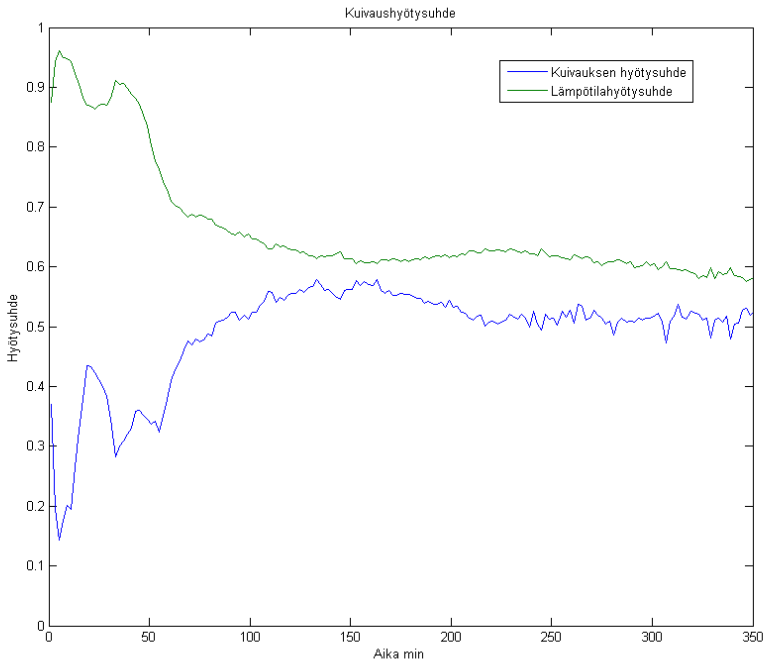
Kuivauksen energian ominaiskulutus E_{om} voidaan laskea yhtälöllä 8.32, jossa E_k on kulutettu energiamäärä ja $M_{vpoisto}$ on sillä haihdutettu vesimäärä.

$$E_{om} = \frac{E_k}{M_{vpoisto}} \tag{8.32}$$

Veden höyrystymislämpö E_h on 0 ºC asteessa 2502 kJ/kg. Vesi höyrystyy jyvästä, jonka lämpötila muuttuu kuivauksen edetessä. Kuvassa 8.25 on esimerkki kauran ja ohran lämpötiloista kuivumisen aikana [Jokiniemi ja Ahokas].

Korkeimmillaan viljan läpötila on kuivauksen lopussa, jolloin se on lähellä poistoilman lämpötilaa. Veden höyrystymislämpö riippuu jyvän lämpötilasta T_j ja se voidaan laskea 0- 40 ºC lämpötiloissa yhtälön 8.33 avulla.

$$E_h = -2,491 \cdot T_j + 2502 \tag{8.33}$$



Kuva 8.26: Kuivauksen hyötysuhde ja lämpötilahyötysuhde kuivauksen aikana

Kun verrataan veden höyrystymislämpöä (minimienergiantarve) kuivaukseen käytettyyn energiamäärään E_k , saadaan kuivauksen hyötysuhde, yhtälö 8.34.

$$\eta = \frac{E_h}{E_k} \tag{8.34}$$

Kuivauksen hyötysuhdetta hyvin lähellä on lämpötilahyötysuhde, yhtälö 8.35. Lämpötilahyötysuhde kertoo, paljonko kuivausilmaan uunissa lisätystä lämpöenergiasta on käytetty kun ilma on kulkenut kuivurin läpi. Siinä oletetaan, että kaikki lisätty lämpö on käytetty viljassa olevan veden haihduttamiseen. Tavallisessa maatalouden kuivauksessa tämä on hyvin lähellä kuivaamishyötysuhdetta.

$$\eta_T = \frac{T_k - T_p}{T_k - T_u} \tag{8.35}$$

η_T	Lämpötilahyötysuhde
T_k	Kuivausilman lämpötila
T_p	Poistoilman lämpötila
T_u	Uunin imuilman lämpötila

Kuvassa 8.26 on esimerkki kuivauksen hyötysuhteen ja lämpötilahyötysuhteen muuttumisesta kuivauksen aikana. Kuivauksen alussa, jolloin lämpöä tarvitaan sekä kuivurikoneikon että viljan lämmittamiseen, lämpötilahyötysuhde antaa selvästi virheellisen tuloksen. Kuivauksen puolivälissä ja loppupuolella hyötysuhteet ovat samaa suuruusluokkaa. Näistä hyötysuhteista energiahyötysuhde on tarkempi, koska se perustuu energian kulutukseen. Lämpötilahyötysuhde soveltuu hyvin kuivurin toiminnan toteamiseen ja sillä nähdään missä suuruusluokassa hyötysuhde on. Siitä on muistettava, että kuivauksen alussa se antaa vääriä tuloksia.

Lämpötilahyötysuhteen käytöllä on rajoituksensa ja sitä ei voida käyttää eri tyyppisten kuivureiden vertailussa. Lämpötilahyötysuhde ei sovellu imukuivurin toiminnan toteamiseen, koska siinä kuivurin vuotojen takia poistoilmaan tulee mukaan myös ulkoilmaa, joka osaltaan jäähdyttää kuivausilmaa ja antaa virheellisen tuloksen. Myöskään se ei sovellu eristetyn ja eristämättömän kuivurin keskenäiseen vertailuun, koska eristämättömän kuivurin poistolämpötilat ovat alhaisempia lämpöhäviöiden takia.

Esimerkki 1. *Viljaerän kuivattu massa on 9600 kg, alkukosteus oli 22% (wb) ja loppukosteus 14% (wb). Tähän kulutettiin 150 l kevyttä polttoöljyä. Mikä oli kuivauksen ominaisenergian kulutus?*

Poistettu vesimäärä on, $M_{vpois} = 9600\frac{0,22-0,14}{1-0,22} = 985$ *kg. Jos öljyä tarvittiin 150 l, öljyn tiheys on 0,83 - 0,84 kg/l ja sen lämpöarvo 43 MJ/kg. Tarvittava öljymassa oli siten 150·0,83 = 124,5 kg ja siinä on energia 5354 MJ (1487 kWh). Yhden vesikilon haihduttamiseen tarvitaan siten 150/985 = 0,15 l pö/kg* H_2O*, 5354/985 = 5,4 MJ/kg* H_2O *(1,5 kWh/kg* H_2O*).*
Mikä on esimerkin höyrystymislämpöön verrattu hyötysuhde?
Oletetaan viljan lämpötilan olevan +10 C, jolloin veden höyrystymislämpö on $E_h = (2502+1,87\cdot 10)\cdot 985 = 2483$ *MJ. Höyrystymislämpöön verrattuna käytettiin 5354-2483 = 2871 MJ enemmän energiaa ja hyötysuhde on* $\eta = \frac{2483}{5354} = 0,46$.

Kirjallisuutta

[Ahokas] Ahokas J. Mittausten suunnittelu ja raportointi. https://www.agrotekno.fi/wp-content/uploads/2023/05/Mittausmoniste.pdf, 26.2.2024

[Ahokas ja Jokiniemi] Ahokas J. ja Jokiniemi T. Viljankuivaus. https://www.energia.agrotekno.fi/wp-content/uploads/2021/04/viljankuivaus.pdf, 11.6.2025

[Albright] Albright L.A. Environment Control for Animals and Plants. ASAE Textbook 4, American Society of Agricultural Engineers, 1990, 453 p.

[ChatGPT] ChatGPT. 2025. Dityppioksidipäästöt maan kosteuden mukaan. PDF-raportti. OpenAI. Viitattu 14.5.2025.

[2006/42/EY] . Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2006/42/EY, koneista ja direktiivin 95/16/EY muuttamisesta

[EU 2000/14/EY] Euroopanparlamentinjaneuvostondirektiivi 2000/14/EY, Ulkona käytettävien laitteiden melupäästöjä ympäristöön koskevan jäsenvaltioiden lainsäädännön lähentämisestä.

[EU 2007/43/EY] NEUVOSTON DIREKTIIVI 2007/43/EY, lihantuotantoa varten pidettävien kanojen suojelua koskevista vähimmäisvaatimuksista

[EU 2009/76/EC] Directive 2009/76/EC of the European Parliament and of the Council of 13 July 2009 relating to the driver-perceived noise level of wheeled agricultural or forestry tractors (Codified version)Text with EEA relevance.

[EU 2015/96] Komission delegoitu asetus (EU) 2015/ 96, - annettu 1 päivänä lokakuuta 2014, - Euroopan parlamentin ja neuvoston asetuksen (EU) N:o 167/ 2013 täydentämisestä maa- ja metsätaloudessa käytettävien ajoneuvojen ympäristöominaisuuksia ja käyttövoimayksikön tehoa koskevien vaatimusten osalta

[Gröhn] Gröhn H. Kylmäpihatoiden olosuhteiden mittaaminen. Pro gradu - tutkielma, Helsingin yliopisto Agroteknologian laitos, Helsinki 2007

[Hassouna ym 2020] Hassouna M., Calvet S., Hayes E., Gates R.S. & Schrade S. Measurement of Gaseous Emissions from Animal Housing. In Holden, N. M., Wolfe, M. L., Ogejo, J. A., & Cummins, E. J. (Ed.), Introduction to Biosystems Engineering, https://doi.org/10.21061/IntroBiosystemsEngineering, 28.4.2025

[Hautala ym] Hautala M., Jokiniemi T. ja Ahokas J. Maatilakuivurit, Departement of agricultural sciences publications 28, Helsingin yliopisto. https://www.energia.agrotekno.fi/julkaisut/, 11.6.2025

[Heimonen ym 2009] Heimonen I., Heikkinen J., Kovanen K., Laamanen J., Ojanen T., Piippo J., Kivinen T., Jauhiainen P., Lehtinen J., Alasuutari S., Louhelainen K. ja Mäittälä J. Maatalouden kotieläinrakennusten toimiva ilmanvaihto. Espoo 2009. VTT Tiedotteita – Research Notes 2521

[Heimonen ym 2012] Heimonen I., Heikkinen J., Laamanen J. ja Kivinen T. Lypsykarjapihaton luonnollinen ilmanvaihto. VTT Technology 2012.

[Heimonen ym 2014] Heimonen I., Heikkinen K., Laamanen J., Alasuutari S. ja Kaila E. Sikaloiden ilmanvaihdon toimivuus. Toimintamalli ilmanvaihdon toimivuuden varmistamiseen. VTT Tecnology 2014.

[HTP-arvot(2020)STM] HTP-ARVOT 2020 Haitallisiksi tunnetut pitoisuudet. Sosiaali- ja terveysministeriön julkaisuja 2020:24. https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/162457-/STM_2020_24_J.pdf?sequence=1&isAllowed=y, 21.2.2025

[IEC 60751] Industrial platinum resistance thermometers and platinum temperature sensors. International Electrotechnical Commission.

[IEC 61672-1] Electroacoustics – Sound level meters – Part 1: Specifications. International Electrotechnical Commission.

[IEC 60584-1] IEC 60584-1:2013 Thermocouples - Part 1: EMF specifications and tolerances. International Electrotechnical Commission in WIKA application of thermocouples, Technical information, WIKA data sheet IN 00.23. https://www.wika.fi/upload/DS_IN0023_en_co_51542.pdf, 4.10.2023

[Ilmatieteen laitos] Ilmastollinen vertailukausi 1991 - 2020, Ilmatieteen laitos, https://www.ilmatieteenlaitos.fi/ilmastollinen-vertailukausi, 21.5.2024

[IPCC AR6] IPCC Global Warming Potential Values, https://ghgprotocol.org/sites/default/files/2024-08/Global-Warming-Potential-Values%20%28August%202024%29.pdf, 28.4.2025

[ISO 3966] ISO 3966:2020 Measurement of fluid flow in closed conduits Velocity area method using Pitot static tube. International Standard Organization.

[ISO 5167] ISO 5167[1] Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full. International Standard Organization.

[ISO 7194] ISO 7194:2008 Measurement of fluid flow in closed conduits Velocity-area methods of flow measurement in swirling or asymmetric flow conditions in circular ducts by means of current-meters or Pitot static tubes. International Standard Organization.

[ISO 7216] ISO 7216:2015, Agricultural and forestry tractors — Measurement of noise emitted when in motion. International Standard Organization.

[Jokiniemi 2016] Jokiniemi Tapani. Energy efficiency in grain preservation. University of Helsinki, Department of Agricultural Sciences, ACADEMIC DISSERTATION 22/2016. https://helda.helsinki.fi/items/f601b6c0-90ee-450c-a09d-58691e65e94c, 9.6.2025

[Jokiniemi ja Ahokas] Drying process optimisation in a mixed-flow batch grain dryer. Biosystems engineering 121 (2014)

[Kasvihuonekaasut ja niiden tulkinta] https://www.ilmatieteenlaitos.fi/kasvihuonekaasujen-mittaus, 14.5.2025

[Kivinen ym] Kivinen T., Ahokas J., Poikalainen V., Teye F., Hautala M., Tamminen P., Veermäe I., Pajumägi A. Kylmäpihattojen toimivuus Suomessa ja Virossa. MTT:n selvityksiä 155. Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskus 2008.

[Launiainen ym] Launiainen, S., Rinne, J., Pumpanen, J., Kulmala, L., Kolari, P., Keronen, P., Siivola, E., Pohja, T., Hari, P., Vesala, T., n.d. Eddy covariance measurements of CO2 and sensible and latent heat fluxes during a full year in a boreal pine forest trunk-space. Boreal Environment Research 10: 569–588, Helsinki 2005

[MMM Rakentamissäädökset] Maa- ja metsätalousministeriön rakentamissäädökset, https://mmm.fi/rakentamismaaraykset, 18.5.2024

[1] Sarjaan kuuluu kaikiaan kuusi stadardia sekä neljä teknistä raporttia

[Mannfors B. ja Hautala M.] Mannfors B. ja Hautala M. Eläinten hyvinvointiin perustuva tuotantoeläinrakennusten mikroilmasto: Ilmanvaihtoon ja lämpötilaan liittyvät suositukset. Maataloustieteiden laitos, Julkaisuja 6. Helsingin Yliopisto 2011. https://www.energia.agrotekno.fi/laskureita/, 5.4.2025

[MMM-RMO C2.2] Maatalouden tuotantorakennusten lämpöhuolto ja huoneilmasto. Maa- ja metsätalousministeriön rakentamismääräykset ja -ohjeet. https://mmm.fi/documents/1410837/1853806/L10-rmoC22-01.pdf/8f0e7d9d-8c62-4c72-a1ef-fa9dd78bf4d0/L10-rmoC22-01.pdf?t=1446462610000, 18.5.2024

[OECD Tractor Code 5] . OECD standard code for the official measurement of noise at the driving position(s) on agricultural and forestry tractors. https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/topics/policy-sub-issues/tractors/05-Code5-EN-February-2025-final.pdf, 15.5.2025

[S. Pedersen] Climatization of Animal Houses. A biographical review of three decades of research. DIAS report Livestock no. 66, 2005

[Seppänen] Seppänen O., Ilmastointitekniikka ja sisäilmasto. LVI-yhdistysten Liitto 1996

[Teye] Teye F. K. Microclimate and gas emissions in dairy buildings: Instrumentation, theory and measurements. Department of Agrotechnology, University of Helsinki, 2008. https://helda.helsinki.fi/browse/author?scope=29bacde1-2a5b-4f5b-82f2-b925ce898000&value=Teye,%20Frederick%20Kwame&bbm.return=1

[Texas Instruments] Application Note, A Basic Guide to Thermocouple Measurements. Texas Instruments, https://www.ti.com/lit/an/sbaa274a/sbaa274a.pdf?ts=1693568348335&ref_url=https%253A%252F%252Fpresearch.com%252F, 2.9.2023

[Vapour pressure of water] Vapour pressure of water, https://en.wikipedia.org/wiki/Vapour_pressure_of_water, 29.3.2025

[Wecktsröm 2005] Weckström T. toim., Lämpötilan mittaus. MIKES Metrologia julkaisu J4/2005. https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/MIKES/2005-J4.pdf, 1.12.2023

[Wu J. 2023] Wu J. A Basic Guide to Thermocouple Measurements. Texas Instruments Application Note. https://www.ti.com/lit/an/sbaa274a/sbaa274a.pdf?ts=1701338571548&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.bing.com%252F, 1.12.2023

[VPN 993/1992] VPN 993/1992. Valtioneuvoston päätös melutason ohjearvoista 29.10.1992.

[VNa 85/2006] VNa 85/2006, Valtioneuvoston asetus työntekijöiden suojelemisesta melusta aiheutuvilta vaaroilta.

[Vähänikkilä ym] Vähänikkilä Aki, Sorainen Esko, Taattola K. & Rytkönen E. Maataloustraktoreidn tärinä ja melu. Työterveyslaitos, Kuopio 2007

[Vömel H.] Saturation vapor pressure formulations. https://cires1.colorado.edu/~voemel/vp.html, 29.3.2025