



MITTATEKNIIKAN KESKUS

Julkaisu J1/2002

LÄMPÖTILAN MITTAUS

Thua Weckström

Helsinki 2002

MITTATEKNIKAN KESKUS

Julkaisu J1/2002

LÄMPÖTILAN MITTAUS

toimittanut

Thua Weckström

Helsinki 2002

Esipuhe

Tämän ohjeen on laatinut metrologian neuvottelukunnan lämpötilatyöryhmä, jonka tehtäviin kuuluu lämpötilasuureesta tiedottaminen.

Lämpötilan mittaus- ja kalibrointiohjeessa käsitellään yleisimpiä lämpötilan mittauksiin käytettäviä laitteita sekä esimerkkien muodossa mittaustuloksien käsittelyä. Mittaustuloksiin liittyy oleellisena osana mittausepävarmuus ja sen arvioinnissa on noudatettu eurooppalaista suositusta EA-4/02 ("Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration"). Esimerkeistä käy myös ilmi miten suositusta sovelletaan käytännön tilanteisiin.

Ohjetta ovat pääosin olleet tekemässä lämpötilatyöryhmän nimeämät neljä henkilöä, Georg Bergström (puhj.), Thua Weckström (siht.), Martti Heinonen ja Urpo Viinikangas. Työn edetessä ohjeen sisältöä on käsitelty koko lämpötilatyöryhmän kokouksissa. Työn loppuvaiheessa työryhmä on erityisesti kiinnittänyt huomiota terminologiaan ja kieliasuun. Haluankin kiittää koko työryhmää siitä tuesta, jonka se on antanut arvokkaiden neuvojen, huomautuksien ja parannusehdotuksien muodossa.

Ryhmän sihteerinä toiminut Thua Weckström on koonnut aineiston ja saattanut sen arvokkaaseen painoasuun. Haluankin koko lämpötilatyöryhmän puolesta esittää hänelle tästä suuresta työpanoksesta parhaat kiitokset.

Lopuksi kiitokset Pentti Kortosalolle, Oy E. Sarlin Ab, Vesa Tepposelle, SKS-Automaatio Oy ja Timo Stjernbergille, Infradex Oy, siitä kuvamateriaalista, jonka työryhmä sai käyttöönsä.

Helsingissä joulukuussa 2001

Georg Bergström

Sisällysluettelo

1. Johdanto	s. 7
2. Lämpötilan mittaaminen	s. 9
3. Mittaustulos ja sen epävarmuus	s. 11
4. Lasilämpömittarit	s. 17
5. Termoelementit	s. 21
6. Vastuslämpömittarit	s. 35
7. Infrapunalämpömittarit	s. 41
8. Kannettavat uunit (Block calibrators)	s. 51
9. Lämpökaapit ja autoklaavit	s. 57
10. Pintalämpömittarit	s. 61
11. Digitaalimittarin simulointikalibrointi	s. 65
12. Lämpömittarin valinta ja oman kalibrointitoiminnan suunnittelu	s. 75
13. Kalibrointiesimerkkejä	s. 77
Liite 1. Kalibrointitulosten käyttö	s. 93
Liite 2. Pt100-antureiden laskentakaavat	s. 95
Liite 3. K-tyyppin termoelementin laskentakaavat	s. 96
Hakemisto	s. 100

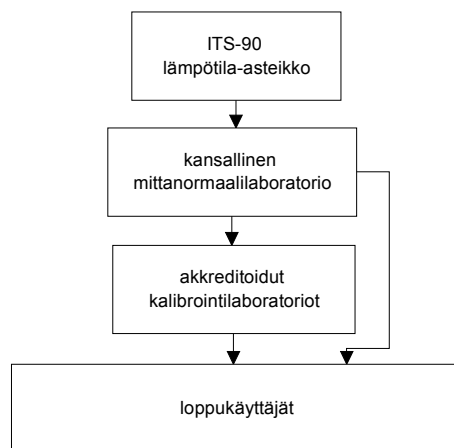
1. JOHDANTO

Tämän kirjan alkuosa on tarkoitettu lämpötilan mittaajille, ja viimeinen luku on suunniteltu lämpömittareiden kalibroijille.

Tärkeissä mittauksissa on käytettävä jäljitettävästi kalibroituja mittauslaitteita luotettavien mittaustuloksien varmistamiseksi.

Mitä kalibrointi sitten on? – Kalibroinnissa katsotaan paljonko mittarin osoitus poikkeaa oikeasta lämpötilasta. Kalibrointiin ei yleensä sisälly mittarin virittämistä, niin että se näyttäisi oikein. Mittaustuloksista laaditaan kalibrointitodistus. Kun kalibroitua mittaria sitten käytetään, pitää mittaustulokset korjata ottamalla mukaan kalibroinnissa todetut poikkeavuudet oikeasta lämpötilasta.

Mittalaite on *jäljitettävästi kalibroitu*, jos kalibrointi on suoritettu sellaisessa laboratoriossa, missä mittanormaalit on jäljitettävästi kalibroitu (kuva 1.1) ja missä henkilökunta osaa kalibroida muita lämpömittareita mittanormaalien avulla ja laskea kalibroinnin epävarmuudet. Akkreditoidussa laboratoriossa ovat jäljitettävyyden ja henkilökunnan pätevyys sekä laboratorion laatuvarmistusjärjestelmä valvonnan alaisina.



Kuva 1.1 Lämpötilamittausten jäljitettävyydekaavio

Suomessa lämpötilan kansallinen mittanormaalilaboratorio on Mittatekniikan keskuksessa. Laboratorion tehtäviin kuuluu lämpötila-asteikon ITS-90 ylläpito, asteikon siirtäminen muille käyttäjille, sekä käyttäjien koulutus.

Akkreditoidut kalibrointilaboratoriot, jotka kalibroivat lämpömittareita ovat (v. 2003)

K004, Inspecta Oy, Helsinki,

K008, Vaisala Oyj, Helsinki

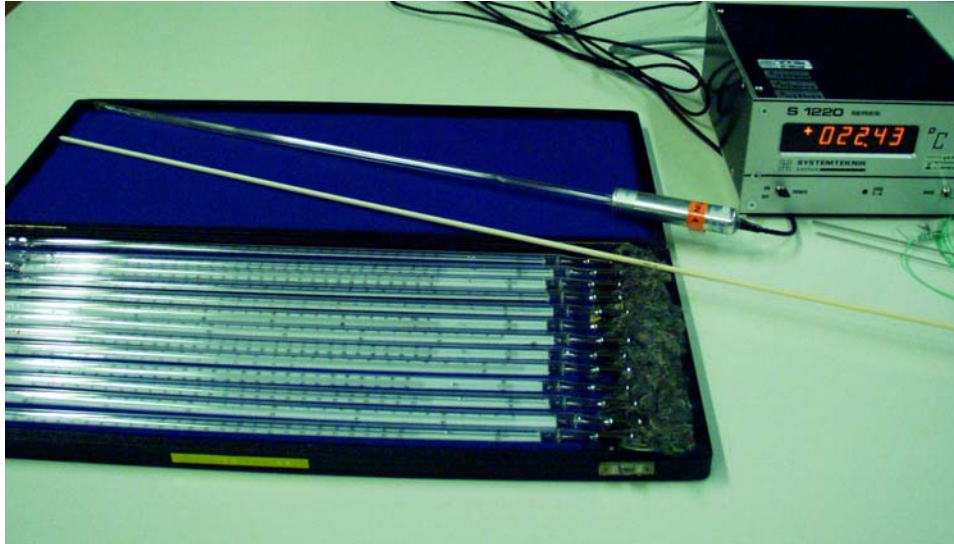
K023, Rautaruukki Oyj, Raah Steel

K025, Satakunnan ammattikorkeakoulu, Temp-Center, Pori.

Ajankohtaista tietoa mittanormaalilaboratoriosta ja akkreditoituista laboratorioista löytyy internet-osoitteelta www.mikes.fi.

2. LÄMPÖTILAN MITTAAMINEN

Kappaleen tai aineen lämpötilan mittaaminen perustuu joko kosketusmittaukseen (lasilämpömittarit, vastuslämpömittarit ja termoelementit) tai koskemattomaan mittaukseen (infrapunalämpömittarit).



Kuva 2.1 Erilaisia lämpömittareita, edessä lasilämpömittarit, sitten S-tyypin termoelementti ja sen takana Pt-100 anturi, joka on kytketty digitaaliseen näyttölaitteeseen.

Kosketusmittauksessa edellytetään, että lämpömittari on riittävän syvälle upotettu mitattavaan väliaineeseen. Jos väliaineena on kiinteä kappale pitäisi lämpömittarille olla riittävän syvä tasku tai onkalo. Pintalämpömittareita ei yleensä upoteta taskuihin, joten pintalämpömittarin kosketus mitattavaan pintaan on yleensä huono, joka saattaa johtaa virheellisiin mittaustuloksiin.

Infrapunalämpömittarin lukemaan vaikuttavat mitattavan pinnan lämpötilan tasaisuus, pintamateriaalin emissiivisyys ja infrapunalämpömittarin optiikan virheet.

Lämpötilan mittaaminen on yleensä hidas toimenpide. Kun mittari on asetettu mittaushetkeen täytyy odottaa, että mittarin lämpötila tasaantuu mittaushetken lämpötilaan ennen kuin mittaus aloitetaan. Mittausta suoritettaessa digitaalinen näyttö varustetulla vastusanturilla, pitää mittari kytkeä päälle hyvissä ajoissa ennen mittausta jotta lämpötila siinä ehtii tasaantua, koska mittausvirta lämmittää mittaria.

Mittaus suoritetaan lukemalla mittaria useampia kertoja (esim. 4...10 kertaa). Jokainen mittausluku kirjoitetaan mittauskirjaan. Mittaustulos on mitattujen lämpötilojen keskiarvo. Tämä arvo korjataan mittarin kalibrointitodistuksessa olevalla arvolla. Kalibrointilaboratorioiden todistuksissa käytetään kahta esitystapaa: virhe tai korjaus. Virhe on mittarin näyttämästä vähennettävä arvo ja korjaus on mittarin näyttämään lisättävä arvo (mittaustulos = mittarin näyttämä miinus virhe, tai mittaustulos = näyttämä plus korjaus). Virheen tai korjauksen etumerkki on otettava huomioon.

Esimerkki 2.1 Kalibrointitodistuksen käyttö

Kalibrointitodistuksessa lukee, että mittarin *virhe* on $-1,2\text{ °C}$. Mittarin näyttämä on $23,1\text{ °C}$. Oikea lämpötila on tällöin $23,1\text{ °C} - (-1,2\text{ °C}) = 24,3\text{ °C}$.

Jos kalibrointitodistuksessa lukee, että mittarin *korjaus* on $-1,2\text{ °C}$ ja mittari näyttää $23,1\text{ °C}$, on oikea lämpötila $23,1\text{ °C} + (-1,2\text{ °C}) = 21,9\text{ °C}$.

Mittaustulokseen liitetään vielä mittauksen epävarmuus, mihin vaikuttaa käytetty lämpömittari, mitattu kohde, ympäristö ja mittaajan huolellisuus

3. MITTAUSTULOS JA SEN EPÄVARMUUS

Jokaisen lämpötilamittauksen tulos on vain arvio mittauskohteen todellisesta lämpötilasta mittaushetkellä. Koskaan emme kykene saamaan täyttä varmuutta tuon lämpötilan tarkasta arvosta johtuen erilaisista mittausvirheistä. Mittaustulos on jonkinlainen keskiarvo mittausarvoista, jotka poikkeavat toisistaan erisuuruisten ja muuttuvien mittausvirheiden vuoksi. Esimerkiksi mittarin näyttämä voi vaihdella sen omasta toiminnastaan johtuen vaikka kohteen lämpötila olisikin muuttumaton. Mittausarvoihin voi vaikuttaa myös vakiosuuruinen eli ns. *systemaattinen virhe*. Tällaisen virheen voi aiheuttaa esimerkiksi mittarin anturin ja todellisen kohteen välisestä etäisyydestä aiheutuva lämpötilaero. Systemaattinen virhe voi olla seurausta myös useista virhelähteistä, joiden yhteisvaikutus ei muutu mittauksen aikana.

Luotettavien mittausten perusedellytys on, että mittauksia toistetaan useita kertoja eli *mittaria luetaan monta kertaa*. Tällöin mittaustulos saadaan mittauslukemien keskiarvona (\bar{q}) eli laskemalla lukemat (q_i) yhteen ja jakamalla näin saatu summa lukemien määrällä (n):

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i = \frac{q_1 + q_2 + \dots + q_n}{n}$$

Keskiarvon laskentaa on havainnollistettu esimerkissä 3.1. Jos tiedetään jonkin tai joidenkin tekijöiden aiheuttavan mittaustulokseen systemaattista virhettä, mittaustulokseen tulisi tehdä sitä vastaava korjaus. Tämän jälkeen mittausepävarmuus arvioidaan satunnaistyyppisiksi oletettujen virheiden perusteella. Tämä suoritetaan määrittämällä ensin kunkin virhelähteen aiheuttama ns. standardiepävarmuus ja yhdistämällä ne sitten taulukossa 3.1. esitetyllä tavalla.

3.1 Standardiepävarmuus

Standardiepävarmuutta voidaan havainnollistaa seuraavasti: Veden lämpötilaksi on mitattu 10,0 °C ja mittarilukeman vaihtelun aiheuttama standardiepävarmuus on 0,2 °C. Tällöin sadasta lukemasta noin 67 on välillä 9,8 °C...10,2 °C. Lisäksi 10,0 °C:sta vähemmän kuin 0,2 °C poikkeavien lukemien määrä on suurempi kuin sellaisten, jotka poikkeavat enemmän.

Nykyisten suositusten mukaan [Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, International Organization for Standardization, 1993 ja EA-4/02 Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration, 1999] standardiepävarmuus voidaan määrittää kahdella tavalla. *Tyypiksi A* kutsuttu menetelmä sopii tilanteeseen, jossa samoissa olosuhteissa tehtyjä havaintoja on useita. Tällöin mittaustulos on yllä esitetyn mukaisesti havaintojen keskiarvo ja tuloksen standardiepävarmuus $u(\bar{q})$ on ns. keskiarvon keskihajonta eli:

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

Keskiarvon keskihajonnan laskemista havainnollistaa esimerkki 3.1. Taulukkolaskentaohjelmissa on yleensä valmiina funktio keskihajonnan laskemiseksi. Tästä saadaan keskiarvon keskihajonta jakamalla se lukemien määrän neliöjuurella.

Esimerkki 3.1 Tyypin A mukainen standardiepävarmuuden laskeminen

Digitaalisella lämpömittarilla mitattiin vesihauteen lämpötilaa. Mittauslukemat ja lukemien hajonnan aiheuttama standardiepävarmuus ovat:

Taulukko 3.1 Mittaustulosten käsittely

Lukeman numero (i)	Lukema (q_i)/°C	$(q_i - \bar{q})$ /°C	$(q_i - \bar{q})^2$ /°C ²
1	15,1	0,05	0,0025*
2	15,0	-0,05	0,0025
3	15,0	-0,05	0,0025
4	15,1	0,05	0,0025
5	15,2	0,15	0,0225
6	15,1	0,05	0,0025
7	15,0	-0,05	0,0025
8	14,9	-0,15	0,0225
9	15,0	-0,05	0,0025
10	15,1	0,05	0,0025
Summa:	150,5	0,00	0,0650

Lukumäärä 10
(n):

Keskiarvo (\bar{q}): $\frac{150,5 \text{ °C}}{10} = 15,05 \text{ °C}$

Standardiepävarmuus $u(\bar{q})$:

$$\sqrt{\frac{0,065 \text{ °C}}{10 \cdot (10 - 1)}} = 0,027 \text{ °C} \approx 0,03 \text{ °C}$$

*Huom: välituloksista ei saa jättää desimaaleja pois!

Kun käytävissä on vain muutama havainto usean asemesta, standardiepävarmuus määritetään *tyypin B* menetelmää käyttäen. Usein tämä merkitsee, että kyseisen lukeman q oletetaan olevan varmasti välillä $(q - a) \dots (q + a)$. Tällöin lukeman standardiepävarmuus $u(q)$ on:

$$u(q) = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (\text{huom: } a \text{ on siis vaihteluvälin puolikas!})$$

jos on yhtä todennäköistä saada mikä tahansa lukema kyseiseltä väliltä.

Tyypillisiä yksittäisiä lukemia ovat esimerkiksi valmistajien spesifikaatioista, kirjallisuudesta tai aiemmista mittaustuloksista saadut arvot. Lukeman arvo voi olla nolla, mutta silti sen epävarmuus on otettava huomioon. Jos esimerkiksi mittarin resoluutio on 0,1 °C (eli mitattava arvo voi muuttua 0,1 °C / 2 = 0,05 °C ilman että se vaikuttaa mittarin näyttämään), siitä aiheutuva korjaus oletetaan olevan nolla mutta standardiepävarmuus on 0,05 °C / $\sqrt{3}$ = 0,03 °C.

Tyypin A menetelmässä mittaustulosten oletetaan yleensä noudattavan ns. *normaalijakaumaa* (eli mittauksia on niin monta, että niistä voidaan tehdä statistinen analyysi) ja muuten tyypin B tapauksessa (standardiepävarmuus arvioidaan muulla tavalla) ns. *tasajakaumaa*, missä kaikki arvot annettujen rajojen sisällä ovat yhtä todennäköisiä.

Kalibrointitodistusten tuloksia käytettäessä standardiepävarmuus saadaan jakamalla kalibroinnin epävarmuus todistuksessa ilmoitetulla kattavuuskertoimella k , joka yleensä on kaksi ($k=2$).

3.2 Mittaustulos ja yhdistetty mittausepävarmuus

Esimerkissä 3.1 laskettiin vain mittarilukeman vaihtelun aiheuttama standardiepävarmuus. Jos halutaan määrittää näiden lukemien perusteella veden todellinen lämpötila mittausturinin kohdalla, täytyy ottaa huomioon myös mittarille kalibroinnin yhteydessä määritetty korjaus (δt_k) sekä mittarin äärellisestä resoluutiosta aiheutuva korjaus (δt_R). Veden lämpötila (t_v) saadaan siten laskemalla nämä yhteen esimerkiksi 3.1 esitetyn keskiarvon kanssa eli:

$$t_v = \bar{q} + \delta t_k + \delta t_R$$

Lopullinen mittaustulos koostuu siis tässä tapauksessa kolmesta tekijästä, joille kullekin voidaan määrittää standardiepävarmuus yllä esitetyllä tavalla. Mittarilukeman keskiarvon epävarmuus $u(\bar{q})$ laskettiin jo esimerkiksi 3.1 keskiarvon keskihajonnan avulla. Kalibrointikorjauksen ja resoluution aiheuttaman korjauksen standardiepävarmuudet $u(\delta t_k)$ ja $u(\delta t_R)$ lasketaan tyypin B menetelmällä. Koko mittauksen standardiepävarmuus $u(t_v)$ saadaan seuraavasti:

- 1) kerrotaan kunkin tekijän standardiepävarmuus itsellään (eli korotetaan toiseen potenssiin)
- 2) lasketaan näin saadut lukemat yhteen ja
- 3) lasketaan tämän summan neliöjuuri.

Eli:
$$u(t_v) = \sqrt{u^2(\bar{q}) + u^2(\delta t_k) + u^2(\delta t_R)}$$

Yleensä mittausepävarmuus ilmoitetaan laajennettuna epävarmuutena U , jolloin standardiepävarmuus on kerrottu kattavuuskertoimella k . Yleisimmin käytetään kerrointa kaksi, mikä vastaa tilannetta, jossa sadasta mittauksesta noin 95 (olettaen normaalijakautumaa) on epävarmuusrajojen sisäpuolella.

Esimerkki 3.2 Mittaustuloksen ja yhdistetyn epävarmuuden laskenta yksinkertaistetussa tapauksessa

Oletetaan edellä esitettyssä tapauksessa, että mittarin kalibrointikorjaus on $0,2\text{ °C}$ lämpötilassa $+15\text{ °C}$. Koska lukemien keskiarvoksi saatiin $15,05\text{ °C}$ äärellisestä resoluutiosta aiheutuva korjaus oletetaan olevan nolla, saadaan mittaustulosten perusteella veden lämpötilaksi:

$$t_v = \bar{q} + \delta t_k + \delta t_R \\ = 15,05\text{ °C} + 0,2\text{ °C} + 0\text{ °C} = 15,25\text{ °C} \approx 15,3\text{ °C}$$

(huom: korjaus liitetään etumerkkineen mittaoslukemaan). Kalibrointitodistuksessa mainittu kalibrointiepävarmuus on $0,1\text{ °C}$ ja kattavuuskerroin on kaksi ($k=2$). Kalibrointikorjauksen standardiepävarmuus on siis $0,1\text{ °C} / 2 = 0,05\text{ °C}$. Resoluutiosta aiheutuva standardiepävarmuus on: $\frac{0,1\text{ °C}}{2\sqrt{3}} = 0,03\text{ °C}$. Näistä voidaan laskea mittauksen standardiepävarmuudeksi:

$$u(t_v) = \sqrt{u^2(\bar{q}) + u^2(\delta t_k) + u^2(\delta t_R)} \\ = \sqrt{(0,03\text{ °C})^2 + (0,05\text{ °C})^2 + (0,03\text{ °C})^2} = 0,07\text{ °C}$$

Tässä esimerkissä mittaustulos muuttui samassa suhteessa kun minkä tahansa siihen vaikuttavan tekijä eli: jos esimerkiksi kalibrointikorjaus olisi muuttunut $-0,1\text{ °C}$, myös mittaustulos olisi muuttunut $-0,1\text{ °C}$. Jos mittareita onkin kaksi, joiden lukemien keskiarvoa käytetään veden lämpötilan määrittämiseen, mittaustulos muuttuukin vain $-0,05\text{ °C}$ toisen mittarin kalibrointikorjauksen muuttuessa $-0,1\text{ °C}$. Vastaavasti käytettäessä esimerkiksi näyttölaitteesta erillään kalibroituja lämpötilalähettämiä, termoelementtejä tai vastusantureita korjaukset virta-, jännite- tai vastusmittauksissa eivät vaikuta mittaustulokseen samassa suhteessa vaan vaikutus voidaan laskea käyttäen ns. *herkkyyskerrointa* (C). Tämä kerroin kertoo, kuinka paljon mittaustulos muuttuu kyseisen tekijän arvon muuttuessa. Esimerkki 3.3 havainnollistaa herkkyyskerroimen käyttöä.

Esimerkki 3.3 Herkkyyskerroimen käyttö yksinkertaistetussa tilanteessa

Herkkyyskerroin voidaan määrittää laskemalla kuinka paljon tietokoneen näyttämä lämpötilalukema muuttuu signaalin muuttuessa. Koska signaalin oletetaan olevan lineaarinen (eli lämpötilanäytämisen muutoksen suhde virran muutokseen on koko käyttöalueella sama), voidaan tulos laskea käyttäen mittausalueen ääripäitä:

$$C = \left(\frac{100\text{ °C} - 0\text{ °C}}{20\text{ mA} - 4\text{ mA}} \right) = 6,25 \frac{\text{°C}}{\text{mA}} = a$$

Havaitaan, että herkkyyskerroin on sama kuin muunnoskäyrän kulmakerroin k . Tietokoneen näyttämien lämpötilalukemien keskiarvo on oletuksen mukaan sama kuin esimerkissä 3.1 eli:

$$t_{\text{ind}} = \bar{q} = 15,00\text{ °C}$$

joten lämpötilaksi saadaan:

$$t_v = t_{\text{ind}} + \delta t_R + C \cdot \delta I_{Lk} + C \cdot \delta I_{DMMk}$$

$$= 15,00 \text{ }^\circ\text{C} + 0 \text{ }^\circ\text{C} + 0 \text{ }^\circ\text{C} + 0,19 \text{ }^\circ\text{C} + 6,25 \frac{^\circ\text{C}}{\text{mA}} \cdot 0,005 \text{ mA} = 15,22 \text{ }^\circ\text{C} \approx 15,2 \text{ }^\circ\text{C}$$

Tämä tuloksen standardiepävarmuus $u(t_v)$ on:

$$u(t_v) = \sqrt{u^2(t_{\text{ind}}) + u^2(\delta t_R) + u^2(\delta I_{Lk}) + [C \cdot u(\delta I_{DMMk})]^2}$$

Tietokoneen näyttämän epävarmuus $u(t_{\text{ind}}) = u(\bar{q})$ on kirjattujen lukemien keskiarvon keskihajonta eli $0,03 \text{ }^\circ\text{C}$ (ks. esimerkit 3.1 ja 3.2). Äärellisestä resoluutiosta aiheutuvan korjauksen epävarmuus on tyypin B menetelmällä arvioituna:

$$u(\delta t_R) = \frac{0,1 \text{ }^\circ\text{C}}{2\sqrt{3}} = 0,029 \text{ }^\circ\text{C}$$

Koska lähettimen kalibrintiepävarmuus oli ilmoitettu todistuksessa lämpötilana, siitä aiheutuva standardiepävarmuus on:

$$u(\delta I_{Lk}) = \frac{0,1 \text{ }^\circ\text{C}}{2} = 0,05 \text{ }^\circ\text{C}$$

eli herkkyyskerrointa ei tarvita tämän arviointiin. Sen sijaan yleismittarin kalibroinnin epävarmuuden vaikutusta ei voida arvioida ilman herkkyyskerrointa:

$$C \cdot u(\delta I_{DMMk}) = 6,25 \frac{^\circ\text{C}}{\text{mA}} \cdot 0,003 \text{ mA} = 0,019 \text{ }^\circ\text{C}$$

Mittaustuloksen standardiepävarmuus on siis:

$$u(t_v) = \sqrt{u^2(t_{\text{ind}}) + u^2(\delta t_R) + u^2(\delta I_{Lk}) + [C \cdot u(\delta I_{DMMk})]^2}$$

$$= \sqrt{(0,03 \text{ }^\circ\text{C})^2 + (0,029 \text{ }^\circ\text{C})^2 + (0,05 \text{ }^\circ\text{C})^2 + (0,019 \text{ }^\circ\text{C})^2}$$

$$= 0,07 \text{ }^\circ\text{C}$$

Veden lämpötilan mittausepävarmuudeksi $U(t_v)$ saadaan näin ollen:

$$U(t_v) = 2 \cdot u(t_v) = 2 \cdot 0,07 \text{ }^\circ\text{C} = 0,14 \text{ }^\circ\text{C} \approx 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$$

(pyöristyksessä on käytetty 5 % sääntöä, jonka mukaan lopputulosta pyöristetään ylöspäin, jos pyöristysvirhe on suurempi kuin 5 % lopputuloksen arvosta. Huom: pyöristyksiä tehdään lopputuloksissa, ei välituloksissa).

Veden lämpötila oli siis $(15,2 \pm 0,2) \text{ }^\circ\text{C}$.

Kirjallisuusluettelo:

Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, International Organization for Standardization, 1993

EA-4/02 Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration, 1999

4. LASILÄMPÖMITTARIT

4.1 Yleistä

Lasilämpömittareiden nestepatsaan neste on yleensä elohopeaa tai spriitä. Myös elohopea-talliummittareita on käytössä. Lämpötilan mittauksen kannalta elohopea on parempi aine kuin sprii, mutta elohopeamittareiden myynti lopetetaan, koska elohopea saastuttaa ympäristöä.

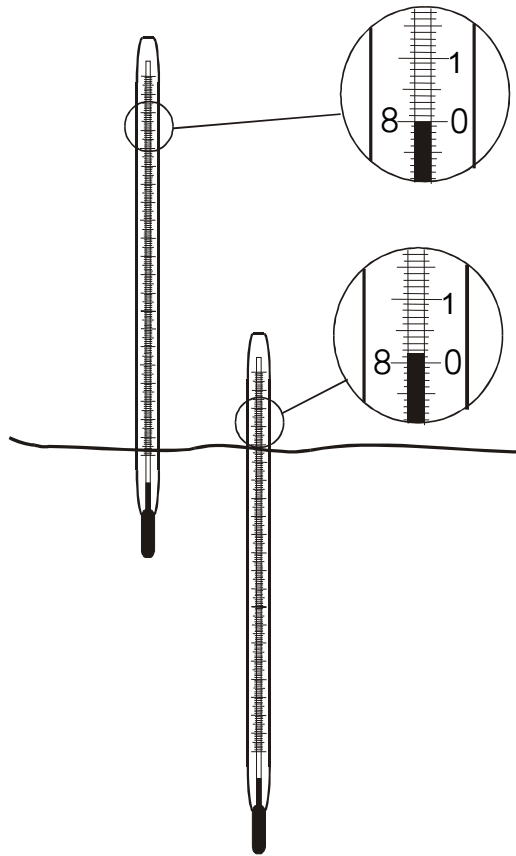
Elohopealämpömittaria ei voi käyttää elohopean jähmettymislämpötilaa $-38,8\text{ °C}$ alhaisemmissa lämpötiloissa, mutta sekoittamalla elohopeaan talliumia päästään lämpötilaan -50 °C . Elohopealämpömittarin maksimilämpötila voi olla jopa 500 °C , mutta sellaisen kalibrointi ja käyttö on hankalaa. Näin korkean lämpötilan mittaamiseen soveltuukin paremmin esim. termoelementti. Spriimittari soveltuu lämpötila-alueelle $-80\text{ °C} \dots +60\text{ °C}$. Lasilämpömittarin asteikon askelarvo (eli jakoväli) on yleensä välillä $0,01\text{ °C} \dots 2\text{ °C}$.

Lasilämpömittarin lukemistarkkuus riippuu mm. asteikon piirtojen etäisyydestä toisistaan ja mittajan kokemuksesta. Yleensä mittaaja kykenee erottamaan ainakin sellaisen lämpötilan muutokset, jotka ovat suuruudeltaan puolet asteikon askelarvosta. Käytettäessä optista lukulaitetta kokenut mittaaja pystyy arvioimaan mittarilukeman toistettavasti jopa askelarvon kymmenesosan tarkkuudella. Mittaria tulisi lukea aina kohtisuoraan eli niin, että silmä on nestepatsaan huipun korkeudella. Mittaria on hyvä myös naputtaa kevyesti ennen mittauksia, jotta nestepatsaan ja kapillaariputken välinen kitka ei häiritse mittauksia.

4.2 Upotussyvyys

Lasilämpömittareiden lukemaan vaikuttaa se, kuinka syväle mittari on upotettu mittauskohteeseensa. Joihinkin mittareihin on kirjoitettu suositeltu upotussyvyys. Tällainen mittari kalibroidaan upotettuna kalibrointihauteeseen annetun upotussyvyyden verran eli juuri niin monta millimetriä kuin mitä mittarissa lukee. Mittaria tulisi myös käyttää tällä tavalla. Jos se ei ole mahdollista, mittarin näyttämään täytyy tehdä korjaus. Jollei upotussyvyyttä ole merkitty mittariin, mittaukset suoritetaan siten että vain muutama millimetri nestepatsaan yläpäästä jää nestepinnan yläpuolelle (ns. täysupotus).

Täysupotuksen käyttöä suositellaan aina, kun se on mahdollista, koska tällöin muutokset ympäristöolosuhteissa heijastuvat vähemmän mittaustuloksiin (ks. kuva 4.1). Jos mittaria käytetään siten, että merkittävä osa elohopeapatsaasta jää mitattavan nesteen pinnan yläpuolelle, ympäristön lämpötila vaikuttaa patsaan korkeuteen eli mittarin lukemaan. Aina kun näin saatuja tuloksia verrataan toisiinsa (esim. kalibrointitodistuksen tuloksiin), on otettava huomioon ympäristöolosuhteista aiheutuva korjaus. Sen määrittämiseen on olemassa erilaisia menetelmiä (ks. esimerkiksi J.V. Nicholas and D.R. White, Traceable temperatures, 1994, John Wiley & Sons, ISBN 0 471 93803 3, sivut 125-141, 214-224).



Kuva 4.1 Ympäristön vaikutus lasilämpömittarin lukemaan

Esimerkki 4.1: Ilman lämpötilan mittaaminen lasilämpömittarilla

Laboratorion ilman lämpötilaa mitataan lasilämpömittarilla (mittari 1), joka on kiinnitetty pöydällä olevaan jalustaan pystysuoraan. Lisäksi laboratorion seinällä on toinen lasilämpömittari (mittari 2). Kummankin mittarin askelarvo on $0,1\text{ °C}$ ja ne on kalibroitu akkreditoidussa kalibrointilaboratoriossa. Kalibrointitodistuksen mukaan mittarin 1 kalibrointikorjaus (δt_{k1}) on $-0,08\text{ °C}$ lämpötilassa $+23\text{ °C}$. Vastaava korjaus mittarille 2 (δt_{k2}) on $+0,12\text{ °C}$. Kalibroinnin epävarmuus oli kummankin mittarin osalta $0,04\text{ °C}$. Kalibrointikorjaukset olivat muuttuneet kalibrointien välillä enintään $0,02\text{ °C}$.

Mittaria 1 luettiin kymmenen kertaa 15 minuutin aikana, jotta saatiin selville lämpötilan mahdollinen muuttuminen. Ensimmäisellä ja viimeisellä kerralla kirjattiin myös mittarin 2 lukema. Mittareita luettiin kohtisuoraan eli nestepatsaan huipun korkeudelta. Mittareihin ei koskettu mittausten aikana.

Arvio ilman lämpötilalle (t_{ilma}) lasketaan mittarilla 1 saatujen lukemien keskiarvon (t_{n1}), mittarin kalibrointikorjauksen (δt_{k1}) sekä mittarin lukemisepävarmuudesta (δt_{le1}) ja epästabiiliudesta pitkällä aikavälillä (δt_{stab1}) aiheutuvan korjausten perusteella. Lisäksi otetaan huomioon lämpötilaerot laboratoriossa (δt_{ero}), jotka määritetään vertaamalla mittarilla 2 saatuja lukemia mittarin 1 lukemiin. Laskenta suoritetaan siten kaavalla:

$$t_{\text{ilma}} = t_{n1} + \delta t_{k1} + \delta t_{le1} + \delta t_{stabl} + \delta t_{ero}$$

Tämä on mittauksen *mittausmalli*.

Lukemisepävarmuudesta ja mittarin epästabiiliudesta aiheutuvien korjausten oletetaan olevan keskimäärin nollia. Myös lämpötilaeroista aiheutuvan korjauksen oletetaan olevan keskimäärin nolla, koska mittarin 1 oletetaan edustavan hyvin tarkastelukohteen lämpötilaa (laboratoriotestit tehdään pöydällä, jolla on mittarin 1 jalusta).

Mittarin 1 lukemien keskiarvo oli 23,05 °C joten arvioksi ilman lämpötilalle saadaan:

$$t_{\text{ilma}} = 23,05 \text{ °C} + (-0,08 \text{ °C}) + 0 \text{ °C} + 0 \text{ °C} + 0 \text{ °C} = 22,97 \text{ °C}$$

Ilman lämpötilan mittausepävarmuus lasketaan seuraavasti:

$$u(t_{\text{ilma}}) = \sqrt{u^2(t_{n1}) + u^2(\delta t_{k1}) + u^2(\delta t_{le1}) + u^2(\delta t_{stabl}) + u^2(\delta t_{ero})}$$

Lukemien keskiarvon standardiepävarmuus arvioitiin keskiarvon keskihajonnan perusteella, joka oli 0,02 °C. Kalibrointikorjauksen standardiepävarmuus on 0,04 °C / 2 = 0,02 °C. Mittaria arvioitiin voitavan lukea luotettavasti askelarvon puolikkaan tarkkuudella, joten siitä aiheutuvan korjauksen standardiepävarmuus on:

$$u(\delta t_{le1}) = \frac{0,05 \text{ °C}}{2\sqrt{3}} = 0,015 \text{ °C}$$

Aiempien kalibrointitulosten perusteella oletetaan, että mittarin näyttämän ja todellisen lämpötilan välinen ero ei ole muuttunut viimeisen kalibroinnin jälkeen enempää kuin 0,02 °C. Epästabiilius-korjauksen standardiepävarmuus on näin ollen:

$$u(\delta t_{stabl}) = \frac{0,02 \text{ °C}}{\sqrt{3}} = 0,012 \text{ °C}$$

Koska mittarin 2 lukema oli keskimäärin 23,10 °C, lämpötilaeroista aiheutuvan korjauksen standardiepävarmuudeksi saadaan:

$$u(\delta t_{ero}) = \frac{(t_{n2} + \delta t_{k2}) - (t_{n1} + \delta t_{k1})}{\sqrt{3}} = \frac{(23,10 \text{ °C} + 0,12 \text{ °C}) - (23,05 \text{ °C} - 0,08 \text{ °C})}{\sqrt{3}} = 0,14 \text{ °C}$$

Mittauksen standardiepävarmuus on:

$$u(t_{\text{ilma}}) = \sqrt{(0,02 \text{ °C})^2 + (0,02 \text{ °C})^2 + (0,015 \text{ °C})^2 + (0,012 \text{ °C})^2 + (0,14 \text{ °C})^2} \approx 0,15 \text{ °C}$$

ja laajennettu epävarmuus $2 \cdot 0,15 \text{ °C} = 0,3 \text{ °C}$. Laboratorion ilman lämpötila oli mittaushetkellä siis $(23,0 \pm 0,3) \text{ °C}$

Kirjallisuutta:

J.V. Nicholas and D.R. White, Traceable temperatures, 1994, John Wiley & Sons, ISBN 0 471 93803 3

5. TERMOELEMENTIT

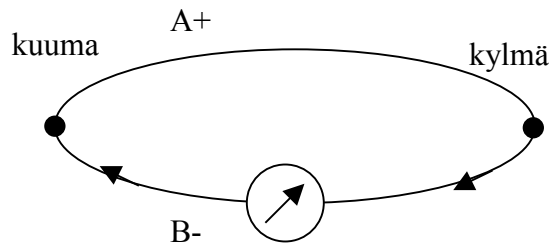
Termoelementti on laajasti käytössä oleva anturityyppi lämpötilan mittauksissa. Moneen sovellutukseen sen yksinkertaisuus ja luotettavuus sekä halpa hinta ovat kilpailukykyisiä ominaisuuksia. Varsinkin yli 500 °C lämpötiloissa termoelementtien käyttö on vastusantureita yleisempää.



Kuva 5.1. Ylhäällä on digitaalilämpömittari, johon on kytketty K-tyypin termoelementti, oikealla on K-tyypin termoelementtilanka, näiden alla on S-tyypin termoelementti suojaputkessaan, ja sen alla on kulta-platina-termoelementti. Alimpana on kulta-platinatermoelementin referenssiiliitos.

5.1 Termosähköinen ilmiö

Kun kahdesta eri sähköä johtavasta materiaalista, yleensä metallista tai metalliseoksesta valmistettua lankaa yhdistetään virtapiiriksi muodostuu termopari. Jos termoparin liitoskohdat ovat eri lämpötiloissa kulkee suljetussa virtapiirissä virta, joka voidaan havaita herkällä mittarilla. Virran synnyttävää sähkömotorista voimaa kutsutaan termosähköiseksi (Seebeck) jännitteeksi.



Kuva 5.2 Termojännitteen syntyminen. Kuvassa on virtapiiriin kytketty galvanometri, joka on analoginen virtamittari. Galvanometrillä kasvaa

Johdinta A nimetään positiiviseksi B johtimeen nähden silloin kun virran kulkusuunta kylmemmässä liitoksessa on A:sta B:hen.

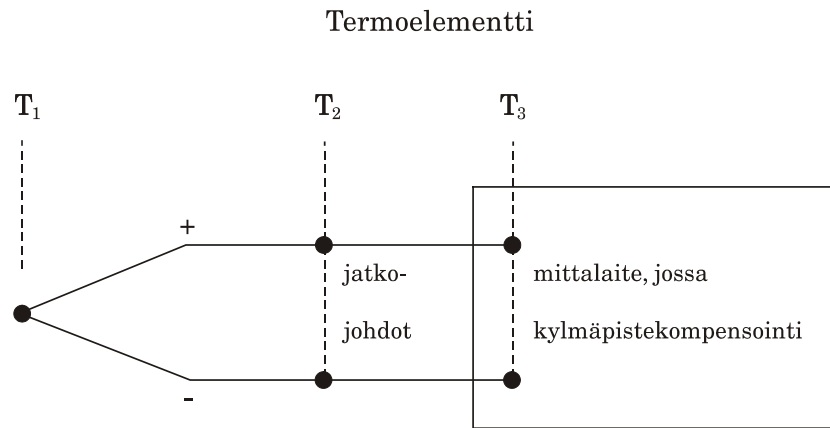
Kun termoelementtiä käytetään lämpömittarina on muistettava, että mitattu termojännite riippuu kahdesta lämpötilasta, *mittauskohteen* (kuuma) ja *vertailupisteen* (kylmä) lämpötiloista. Tämän johdosta mitattavan kohteen lämpötilan määrittämiseksi on termojännitteen lisäksi tunnettava vertailupisteen lämpötila.

Termoelementtitaulukoiden jännitearvot ja laskentapolynomien antamat arvot on laskettu vertailulämpötilalle 0 °C . Jos vertailupisteen lämpötila poikkeaa lämpötilasta 0 °C on mitattuun termojännitteeseen tehtävä korjaus ennen termojännitteen muuttamista lämpötilaksi. Korjauksen suuruus on vertailupisteen lämpötilaa vastaava termojännite. Laskut on tehtävä jännitetasolla siitä syystä, että termojännitteen ja lämpötilan välinen yhteys ei yleensä ole lineaarinen.

5.2 Kylmäpistekompensointi

Lämpömittari, joka käyttää termoelementtiä anturina, osaa muuttaa mitatun termojännitteen suoraan lämpötilalukemaksi. Siinä on sisäänrakennettu ns. kylmäpistekompensointi, joka sähköisesti lisää vertailulämpötilan jännitekorjauksen.

Jännite mitataan yleensä alla olevan kuvan mukaisella kytkennällä.



Kuva 5.3 Termoelementin kytkentä

Termojännitteen suuruuteen vaikuttavat sekä mittauskohteen (T_1) että vertailupisteen (T_2) lämpötilat jos oletetaan, että jatkojohdot ovat ideaaliset. Mittalaite on lämpötilanäytöllä varustettu jännitemittari. Standardin IEC-584 termojännite/lämpötila-aulukot on tehty niin, että kylmän pisteen lämpötilaksi on oletettu 0 °C . Mittalaitteeseen on ohjelmoitu näitä taulukoita, mutta mittaustulokseen lisätään se termojännite, joka vastaa mittalaitteen sisäistä lämpötilaa.

5.3 Termoelementtityypit

Termoelementit jaetaan käytettyjen metallien ja metalliseoksien mukaan jalometalli- ja perusmetallitermoelementteihin.

Taulukko 5.1. Tavallisimmat jalometallitermoelementtityypit

Tunnuskirjain	Lankamateriaali	Standardi
S	Pt10Rh-Pt	IEC 584
R	Pt13Rh-Pt	IEC 584
B	Pt30Rh-Pt6Rh	IEC 584

Taulukko 5.2. Perusmetallitermoelementtityypit

Tunnuskirjain	Lankamateriaali	Standardi
U	Cu-CuNi	DIN 43710
T	Cu-CuNi	IEC 584
L	Fe-CuNi	DIN 43710
J	Fe-CuNi	IEC 584
K	NiCr-Ni	IEC 584
E	NiCr-CuNi	IEC 584
N	NiCrNi-NiSi	IEC 584

Cu-CuNi- ja Fe-CuNi-termoelementtejä on sekä DIN että IEC standardin mukaisia. Virheiden välttämiseksi kannattaa aina varmistaa minkä standardin termoelementti on kyseessä.

IEC (International Electrotechnical Commission) on vuonna 1995 julkaissut termoelementtien standardin IEC 584-1 Second Edition 1995-09. Standardissa on annettu R-, S-, B-, J-, T-, E-, K- ja N-tyypin termoelementtien taulukot ja laskentakaavat (viite, liitteessä 3 K-tyypin esimerkki).

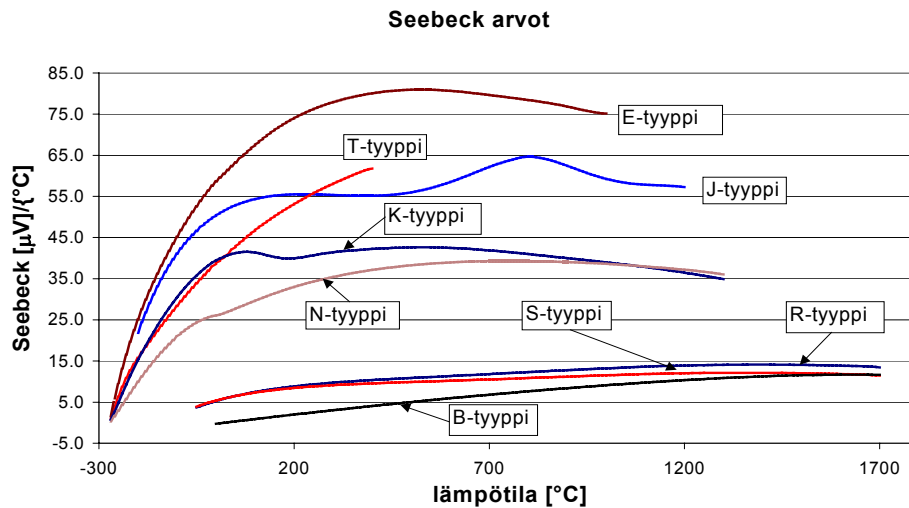
5.4 Uusia termoelementtityyppejä

Kulta-platina, Au-Pt, termoelementtiä on lähinnä käytetty tutkimusmielessä. Sen stabiiliusominaisuudet ovat hyvät ja käyttöalue ulottuu lämpötilaan 1000 °C. Tulevaisuudessa Au-Pt termoelementti saattaa ainakin osittain korvata R- ja S-tyypin termoelementtejä.

Platina-palladium, Pt-Pd, termoelementillä on suuri termojännite verrattuna R-, S- ja B-tyypin elementteihin. Käyttöalueen yläraja on lähellä palladiumin sulamispistettä (1550 °C). Palladiumlanka menee helposti poikki, joten tällainen termoelementti kannattaa hankkia vain erikoismittauksiin.

5.5 Termoelementin Seebeck kertoimet

Termoelementin herkkyyttä kuvataan sen Seebeck kertoimella ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$). Kuvassa 5.4 näkyy standardin IEC-584-1 termoelementtien Seebeck kertoimet. Kuvasta näkyy, että arvot riippuvat yleensä lämpötilasta. Jalometallielementeillä (R-, S- ja B-tyyppi) on pienet Seebeck arvot, alle $15 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$. Eniten käytetyn K-tyypin arvo on noin $40 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$. E-tyypillä on suurin kerroin, suurimmillaan yli $75 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$.



Kuva 5.4 Termoelementtien Seebeck kertoimet

5.6 Termoelementtien ominaisuuksia

Taulukko 5.3 Termoelementtien ominaisuuksia

Tyyppi	Ympäristö	Kommentti	Lämpötila-alue (°C)
B	hapettava neutraali	korkeat lämpötilat, välttä kosketusta metalleihin	...1700
J	hapettava neutraali pelk.tyhjö	korroosio yli 500 °C	0...760
K	hapettava neutraali	"green-rot" korroosio pelkistävässä ympäristössä	-200...1260
N	hapettava neutraali	stabiili, kehitetty korvaamaan K- tyyppi	0...1300
R&S	hapettava neutraali	välttä kosketus metalleihin	...1400
T	hapettava neutraali pelk.tyhjö	alhaiset lämpötilat, sietää kosteutta	-200...370

Lähde: Traceable Temperatures, J.V. Nicholas and D.R. White, s. 249

5.7 Termoelementtilankojen minimipaksuus jatkuvassa käytössä

Alla oleva taulukko antaa suosituksen korkeimmasta jatkuvasta lämpötilasta ja langan minimipaksuudesta (lähde: J.V. Nicholas and D.R. White, Traceable Temperatures s. 249).

Taulukko 5.4 Korkein lämpötila minimipaksuuden funktiona

Termoelementti tyyppi	Langan halkaisija (mm)				
	3,25	1,63	0,81	0,51	0,33
B				1700 °C	
E	870 °C	650 °C	540 °C	430 °C	430 °C
J	760 °C	590 °C	480 °C	370 °C	370 °C
K	1269 °C	1090 °C	980 °C	870 °C	870 °C
R & S				1480 °C	
T		370 °C	260 °C	200 °C	200 °C

Pieni halkaisija lyhentää yleensä termoelementin käyttöikää korkeissa lämpötiloissa.

5.8 Termoelementin rakenne

Termoelementti joudutaan tavallisesti eristämään ja suojaamaan ympäristön vaikutuksilta. Paras mahdollinen suojaus on harkittava kussakin tapauksessa erikseen.

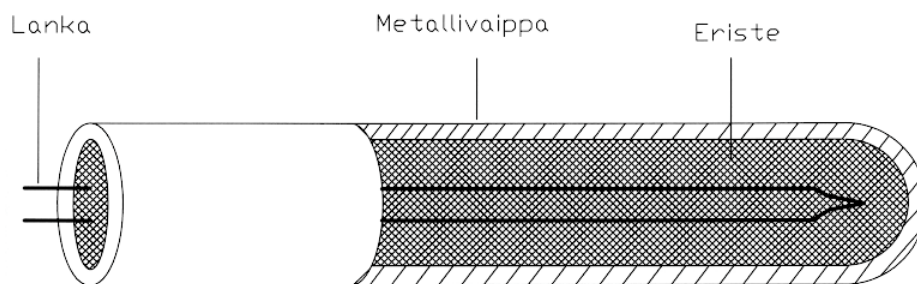
On varmistauduttava siitä, ettei eristysaine eikä suojaputki muuta lankojen kemiallista koostumusta.

Eristysaineen tehtävänä on taata riittävä sähköinen eristyskyky käyttöolosuhteissa. Valinnassa on huomioitava lämpötila, lämpötilan vaihtelut, mekaaninen kestävyys ja kemiallinen käyttäytyminen.

Suojausputkimateriaalin valintaan vaikuttaa sen käyttäytyminen sekä termoelementtilankojen että käyttöympäristön suhteen.

Termoelementti voidaan myös valmistaa taipuisasta MI- (Mineral Insulated Thermocouple Cable) kaapelista, jossa eristysaineena on magnesium- tai alumiinioksidi pulveri ja metallivaippana useita vaihtoehtoja. Lähes kaikkia perusmetallitermoelementtejä on saatavana MI-kaapelina. MI-kaapelin ominaisuuksia:

- voidaan valmistaa hyvin pitkiä termoelementtejä, kymmeniä metrejä
- helppokäyttöisyys
- hyvä sähköinen eristys
- pienin halkaisija alle 1 mm, jopa 0,1 mm
- tärinän kesto



Kuva 5.5. MI-termoelementin rakenne

5.9 Termoelementtilankojen epähomogeenisuus

Termojännite ei ole liitoskohtajännite, vaan sen synnyttää lämpötilagradientti mittauspisteen ja vertailupisteen välillä. Jos langat ovat homogeenisia riippuu termojännite pelkästään liitoskohtien lämpötilasta. Epähomogeenisessa langassa termojännite riippuu myös gradienttien ja epähomogeenisuuksien paikallisista suhteista eikä pelkästään liitoskohtien lämpötiloista.

Lankojen epähomogeenisuus on merkittävä virhelähde termoelementeissä. Epähomogeenisuudet voivat ajan mittaan syntyä muuttuneista kemiallisista suhteista tai lankojen vääntelyn aiheuttamasta kylmämuokkauksesta.

5.10 Näyttölaite

Näyttölaitetta hankittaessa kannattaa kiinnittää huomiota seuraaviin asioihin:

- termoelementtityyppien valintamahdollisuus
- kylmäpistekompensointi
- näyttölaitteen resoluutio
- kanavien lukumäärä
- termoelementtiliittimen standardinmukaisuus
- väyläliitäntä (esim. RS232)

Esimerkki 5.1 Termoelementin käyttö lämpökäsittelyuunissa

Lämpökäsittelyuunin lämpötilan tasaisuuden mittaamiseen käytetään K-tyyppin termoelementtejä ja monikanavapiirturia. Tässä esimerkissä käsitellään yhden anturin mittaustulosta. Uunin asetusarvo on 900 °C.

K-tyyppin anturin kalibrointikorjaus lämpötilassa 900 °C on -2 °C ja epävarmuus 2 °C kattavuuskertoimella $k=2$. Piirturin kalibrointikorjaus on +3 °C ja epävarmuus 5 °C kattavuuskertoimella $k=2$. Piirturipaperilta lämpötila voidaan lukea ± 2 °C tarkkuudella, tasainen jakauma. Termoelementin stabiiliutta ei tässä huomioida, koska se on pieni verrattuna piirturin epävarmuuteen

Lämpötilan tasaannuttua piirturipaperilta arvioidaan lämpötilan keskiarvoksi 904 °C ja huojunnaksi ± 4 °C, tasainen jakauma

Uunin lämpötila ja epävarmuus lasketaan seuraavan kaavan avulla:

$$t_{\text{UUNI}} = t_{\text{MIT}} + \delta t_{\text{CALP}} + \delta t_{\text{CALK}} + \delta t_{\text{RES}}$$

missä

t_{MIT}	piirturipaperilta luettu lämpötila
δt_{CALP}	piirturin kalibrointikorjaus
δt_{CALK}	K-tyyppin anturin kalibrointikorjaus
δt_{RES}	piirturipaperin resoluutiosta johtuva korjaus

Mitattu lämpötila (t_{MIT}): Piirturipaperilta lämpötilan keskiarvoksi arvioidaan 904 °C. Lämpötilakäyrän maksimipoikkeamat keskiarvosta ovat rajojen ± 4 °C sisällä. Oletetaan tasainen jakauma, jolloin standardiepävarmuus = $4/\sqrt{3}$ °C.

Piirturin kalibrointikorjaus (δt_{CALP}): Kalibrointitodistuksen mukaan piirturin korjaus lämpötilassa 900 °C on +3 °C, korjauksen epävarmuus on ± 5 °C, normaalijakauma, $k=2$.

K-tyyppin anturin kalibrointikorjaus (δt_{CALK}): Kalibrointitodistuksen mukaan anturin korjaus lämpötilassa 900 °C on -2 °C, korjauksen epävarmuus on 2 °C, normaalijakauma, $k=2$. Anturissa on kiinteät jatkojohdot niin, että niistä ei aiheudu epävarmuutta.

Piirturipaperin resoluutiosta johtuva korjaus (δt_{RES}): resoluutio on 5 °C, tasainen jakauma, jolloin standardiepävarmuus on $5/\sqrt{3}$ °C

Epävarmuuslaskelma esitetään taulukkomuodossa

Taulukko 5.5 Epävarmuuslaskennan komponentit

Suure	Arvio	Standardiepävarmuus	Jakauma	Herkkyys - kerroin C_i	Epävarmuus $u_i(y)=C_i \cdot u(x_i)$
X_i	x_i	$u(x_i)$			
t_{MIT}	904 °C	2,31 °C	tasa	1	2,31 °C
δt_{CALP}	3 °C	2,50 °C	normaali	1	2,50 °C
δt_{CALK}	-2 °C	1,00 °C	normaali	1	1,00 °C
δt_{RES}	0	1,20 °C	tasa	1	1,15 °C
t_{UUNI}	905 °C		Yhdistetty epävarmuus $u(y)$		3,73 °C

Laajennettu epävarmuus: $U = k \cdot u(y) = 2 \cdot 3,73 \text{ °C} = 7,5 \text{ °C}$.

Mittaustulos: 905 °C ± 8 °C.

Koko uunin lämpötilan tasaisuus voidaan arvioida kun jokaisen anturin mittaustulos käsitellään vastaavalla tavalla.

Esimerkki 5.2 K-tyypin termoelementin kalibrointituloksen laskeminen

Termoelementti kalibroidaan uunissa mittaamalla sen termojännite n. 900 °C lämpötilassa. Lämpötilanormaalina käytetään kiintopistekalibroituja S-tyypin termoelementtiä. Kalibroitavan termoelementin toinen pää viedään tasausjohdon välityksellä 0 °C lämpötilaan, josta termojännite mitataan kuparijohtimien avulla. Kalibroitavan anturin upotussyvyys on noin 400 mm. Termojännite mitataan digitaalivolttimittarilla, jonka mittaasepävarmuus on 3,0 μV kattavuuskertoimella $k = 2$.

Kalibroitavan termoelementin termojännitteet on muutettu lämpötilaksi käyttäen standardia IEC 584-1 Second Edition (1995).

Mittaustulokset

Taulukko 5.6 Mittaustulokset verrattuna IEC 584-standardiin

	mitattu lämpötila S-tyyppi t_{90} [°C]	mitattu termojännite K-tyyppi [mV]	vastaava lämpötila t_{IEC} [°C]	$t_{90} - t_{IEC}$ korjaus [°C]
	896,7	37,234	897,7	-1,0
	896,8	37,238	897,8	-1,0
	896,8	37,239	897,8	-1,0
	896,7	37,237	897,8	-1,1
	896,6	37,235	897,7	-1,1
keskiarvo	896,7	37,237	897,8	-1,0
ka keskihaj.	0,037	0,00093	0,023	0,024

Mittaustuloksien laskennassa on käytetty seuraavia kaavoja:

$$t_{90} = t_S(E_S + \delta E_S + \delta E_{SD} + \frac{\delta t_{S0}}{C_{S0}}) + \delta t_S + \delta t_{SD} + \delta t_{UUNI}$$

$$t_{IEC} = t_{IEC}(E_X + \delta E_X + \delta E_{XD} + \delta E_{JATK} + \frac{\delta t_{X0}}{C_{X0}})$$

$$\delta t_{IEC} = t_{90} - t_{IEC}$$

Oletuksella, että δE_S , δE_{SD} , δt_{S0} , δE_X , δE_{XD} , δE_{JATK} ja δt_{X0} ovat suhteellisen pieniä voidaan yhtälöt kirjoittaa muotoon:

$$t_{90} = t_S(E_S) + C_{St} \cdot (\delta E_S + \delta E_{SD}) + \frac{C_{St}}{C_{S0}} \cdot \delta t_{S0} + \delta t_S + \delta t_{SD} + \delta t_{UUNI}$$

$$t_{IEC} = t_{IEC}(E_X) + C_{Xt} \cdot (\delta E_X + \delta E_{XD} + \delta E_{JATK}) + \frac{C_{Xt}}{C_{X0}} \cdot \delta t_{X0}$$

Herkkyyskertoimet ovat muotoa:

$$C_{St} = \left(\frac{\partial t_S}{\partial E_S} \right) \quad C_{S0} = \left(\frac{\partial t_{S0}}{\partial E} \right)$$

$$C_{Xt} = \left(\frac{\partial t_{IEC}}{\partial E_X} \right) \quad C_{X0} = \left(\frac{\partial t_{X0}}{\partial E} \right)$$

Numeroarvot herkkyyskertoimille saadaan käyttäen standardin IEC 584-1 Second Edition 1995 taulukoita tai laskentakaavoja.

missä

t_{90} Lämpötila ITS-90 asteikon mukaan

E_S, E_X Jännitemittarin näyttämä S- ja K-tyyppin antureille

t_S S-tyyppin kalibrointituloksia käyttäen saatu mitattua termojännitettä E_S vastaava lämpötila.

t_{IEC} IEC 584-1 standardin laskentakaavaa käyttäen saatu mitattua termojännitettä E_X vastaava lämpötila.

δt_{IEC} Kalibroitavan anturin korjaus lämpötilaan t_{90} , $\delta t_{IEC} = t_{90} - t_{IEC}$

δE_S Jännitemittarin kalibroinnista johtuva korjaus S-tyyppin jännitemittauksessa

δE_{SD}	Jännitemittarin ajautumasta (kalibrointien välillä) johtuva korjaus, S-tyypin mitta
δt_S	S-tyypin anturin kalibroinnista johtuva korjaus
δt_{SD}	S-tyypin anturin ajautumasta johtuva korjaus
δt_{UUNI}	Uunin lämpötilagradienteista johtuva korjaus lämpötilaan
δE_X	Jännitemittarin kalibroinnista johtuva korjaus K-tyypin jännitemittauksessa
δE_{XD}	Jännitemittarin ajautumasta (kalibrointien välillä) johtuva korjaus
δE_{JATK}	Jatkojohtimista johtuva korjaus
$\delta t_{S0},$ δt_{X0}	Jääpisteestä johtuva korjaus, S- ja K-tyypin anturit

Epävarmuustekijät

$t_S(E_S)$	Mittanormaalina käytetyn S-tyypin anturin mittaustuloksista lasketun lämpötilan keskiarvo on 896,7 °C ja keskiarvon keskihajonta 0,037 °C ($k=1$), normaalijakauma.
$t_{IEC}(E_X)$	Kalibroitavan K-tyypin mittaustuloksista lasketun lämpötilan keskiarvo on 897,8 °C ja keskiarvon keskihajonta 0,023 °C ($k=1$), normaalijakauma
δt_S	S-tyypin termoelementin kalibroinnista tuleva korjaus on otettu huomioon $t_S(E_S)$ laskennassa, kalibrointiepävarmuus on kalibrointitodistuksen mukaan 0,2 °C ($k=2$), normaalijakauma
δt_{SD}	S-tyypin anturin ajautumasta johtuva epävarmuus arvioidaan olevan $\pm 0,2$ °C, tasajakauma
δt_{UUNI}	Lämpötilagradientit kalibrointiuunissa ± 1 °C, tasajakauma, standardiepävarmuus $1/\sqrt{3}$ °C = 0,577 °C
δE_S	Digitaalivolttimittarin kalibrointiepävarmuus 2 μV ($k=2$), S-tyypin jännitemittaus, S-tyypille (900 °C) 1 μV :n muutos jännitearvossa muuttaa lämpötilalukemaa 0,089 °C, herkkyyskerroin C_{St} on 0,089 °C/ μV
δE_{SD}	Digitaalivolttimittarin ajautumaksi on arvioitu $\pm 1,5$ μV , tasajakauma, herkkyyskerroin C_{St} S-tyypille (900 °C) on 0,089 °C/ μV
δE_X	Digitaalivolttimittarin kalibrointiepävarmuus 2 μV ($k=2$), K-tyypin jännitemittaus, K-tyypille (900 °C) 1 μV :n muutos jännitearvossa muuttaa lämpötilalukemaa 0,025 °C, herkkyyskerroin C_{Xt} on 0,025 °C/ μV
δE_{XD}	Digitaalivolttimittarin ajautumaksi on arvioitu $\pm 1,5$ μV , tasajakauma, herkkyyskerroin C_{Xt} K-tyypille (900 °C) on 0,025 °C/ μV .
δE_{JATK}	Jatkojohtojen (kalibroitava K-tyyppi) aiheuttama epävarmuus on ± 5 μV , tasajakauma, herkkyyskerroin C_{Xt} K-tyypille (900 °C) on 0,025 °C/ μV
$\delta t_{S0}, t_{X0}$	Vertailupisteinä on jääpiste, jonka epävarmuus on $\pm 0,005$ °C, tasajakauma, standardiepävarmuus $0,005/\sqrt{3}$ °C = 0,003 °C. Herkkyyskerroimet ovat: K-tyyppi $C_{X0} = 0,0253$ °C/ μV ja $C_{Xt} = 0,0250$ °C/ μV S-tyyppi $C_{S0} = 0,185$ °C/ μV ja $C_{St} = 0,089$ °C/ μV

$$\frac{C_{St}}{C_{S0}} = 0,4811, \quad \frac{C_{Xt}}{C_{X0}} = 0,9881$$

Epävarmuuslaskelma esitetään taulukkomuodossa

Taulukko 5.7

Suure	Arvo	Standardi- epävarmuus $u(x_i)$	Jakauma	Herkkyyskerroin C_i	Epävarmuus $u_i(y) =$ $C_i \cdot u(x_i)$
$t_S(E_S)$	896,7 °C	0,037 °C	normaali	1	0,037 °C
$t_{IEC}(E_X)$	897,8 °C	0,023 °C	normaali	1	0,023 °C
δt_S	0 °C	0,10 °C	normaali	1	0,100 °C
δt_{SD}	0 °C	0,10 °C	tasa	1	0,115 °C
δt_{UUNI}	0 °C	0,58 °C	tasa	1	0,577 °C
δE_S	0 μ V	1,0 μ V	normaali	0,089 °C/ μ V	0,089 °C
δE_{SD}	0 μ V	0,9 μ V	tasa	0,089 °C/ μ V	0,080 °C
δE_X	0 μ V	1 μ V	normaali	0,025 °C/ μ V	0,025 °C
δE_{XD}	0 μ V	0,9 μ V	tasa	0,025 °C/ μ V	0,022 °C
δE_{JATK}	0 μ V	2,9 μ V	tasa	0,025 °C/ μ V	0,072 °C
δt_{S0}	0 °C	0,003 °C	tasa	0,48	0,001 °C
δt_{X0}	0 °C	0,003 °C	tasa	0,99	0,003 °C
δt_{IEC}	-1,1 °C		Yhdistetty epävarmuus $u(y)$		0,615 °C

Laajennettu epävarmuus: $U = k \cdot u(y) = 2 \cdot 0,615 \text{ °C} = 1,23 \text{ °C}$

Tulos:

Lämpötila t_{90} [°C]	Mitattu jännite [mV]	Vastaava lämpötila t_{IEC} [°C]	Korjaus $t_{90} - t_{IEC}$ [°C]	Kalibroinnin epävarmuus [°C]	Anturin upotussyvyys [mm]
896,7	37,237	897,8	-1,1	1,2	400

Epävarmuuslaskelma esitetään taulukkomuodossa

Taulukko 5.7

Suure	Arvo	Standardiepävarmuus $u(x_i)$	Jakauma	Herkkyyserroin C_i	Epävarmuus $u_i(y) = C_i \cdot u(x_i)$
$t_S(E_S)$	896,7 °C	0,037 °C	normaali	1	0,037 °C
$t_{IEC}(E_X)$	897,8 °C	0,023 °C	normaali	1	0,023 °C
δt_S	0 °C	0,10 °C	normaali	1	0,100 °C
δt_{SD}	0 °C	0,10 °C	tasa	1	0,115 °C
δt_{UUNI}	0 °C	0,58 °C	tasa	1	0,577 °C
δE_S	0 μV	1,0 μV	normaali	0,089 °C/μV	0,089 °C
δE_{SD}	0 μV	0,9 μV	tasa	0,089 °C/μV	0,080 °C
δE_X	0 μV	1 μV	normaali	0,025 °C/μV	0,025 °C
δE_{XD}	0 μV	0,9 μV	tasa	0,025 °C/μV	0,022 °C
δE_{JATK}	0 μV	2,9 μV	tasa	0,025 °C/μV	0,072 °C
δt_{S0}	0 °C	0,003 °C	tasa	0,48	0,001 °C
δt_{X0}	0 °C	0,003 °C	tasa	0,99	0,003 °C
δt_{IEC}	-1,1 °C		Yhdistetty epävarmuus $u(y)$		0,615 °C

Laajennettu epävarmuus: $U = k \cdot u(y) = 2 \cdot 0,615 \text{ °C} = 1,23 \text{ °C}$

Tulos:

Lämpötila t_{90} [°C]	Mitattu jännite [mV]	Vastaava lämpötila t_{IEC} [°C]	Korjaus $t_{90} - t_{IEC}$ [°C]	Kalibroinnin epävarmuus [°C]	Anturin upotussyvyys [mm]
896,7	37,237	897,8	-1,1	1,2	400

Kirjallisuusluettelo

1. Manual on The Use of Thermocouples in Temperature Measurement, Fourth Edition, 1993, ISBN 0-8031-1466-4
2. Traceable Temperatures, An Introduction to Temperature Measurement and Calibration, J. V. Nicholas and D. R. White, 1994, WILEY, ISBN 0-471-93803-3
3. INTERNATIONAL STANDARD IEC 584-1 Second Edition 1995-09, Reference number CEI/IEC 584-1: 1995

6. VASTUSLÄMPÖMITTARIT

Vastuslämpömittari on laite, jonka anturi-aineen sähköinen vastusarvo on riippuvainen lämpötilasta. Anturiosan pitää olla asianmukaisesti asennettu ja suojattu.

Parhaiten vastusantureiksi soveltuvat eräät johteet, lähinnä metallit ja metalliseokset sekä tietyntyyliset puolijohteet.

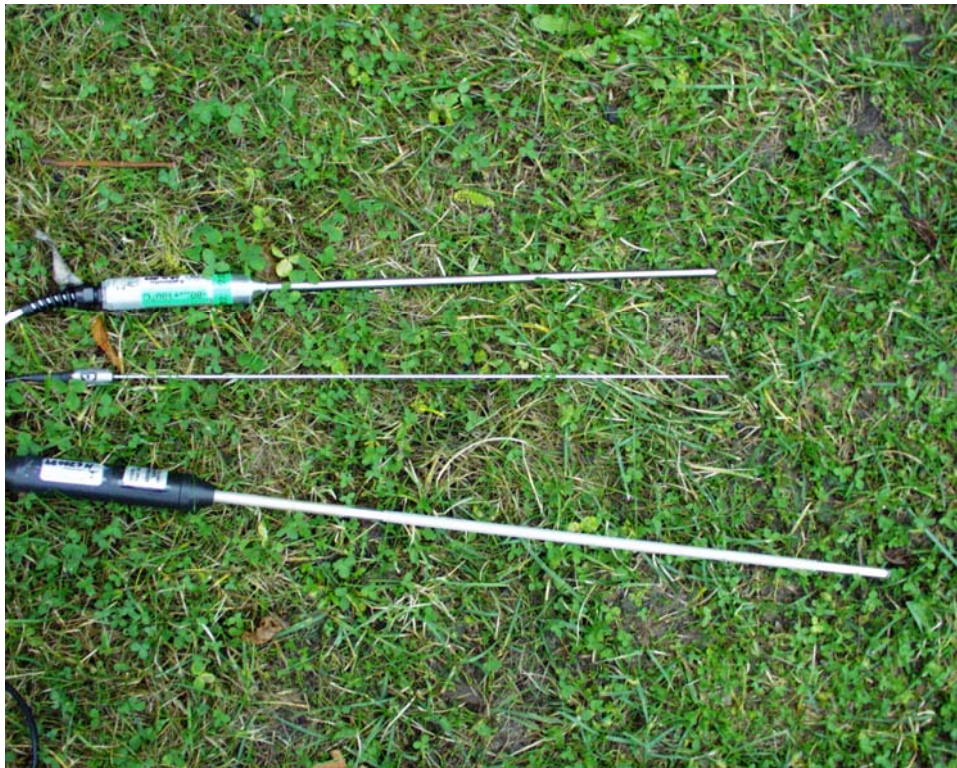
Tavallisimmin käytetyt anturit on valmistettu platinasta, kuparista, nikkelistä tai metallioksidien seok-
sista (termistorit).

6.1 Teollisuuden platinavastusanturit

Platinavastusanturit voidaan jakaa kahteen ryhmään:

- lanka-anturi (langan paksuus 0,05 mm)
- platinakalvo-anturi

Yleisimmin käytetty standardisoitu resistanssiarvo 0 °C lämpötilassa on $R_0 = 100 \Omega$ (Pt100-anturi).



Kuva 6.1 Pt100-antureita, edessä kvartsikuorinen anturi ja sen takana kaksi metallikuorisaa antureita

6.2 Tarkkuus ja stabiilius

Vaatimattoman ja keskitason mittaustarkkuuden mittauksissa voidaan yleensä luottaa standarditaulukoihin. On kuitenkin aina tärkeätä tarkastaa nollapisteen resistanssi ennen anturin käyttöönottoa jäähauteessa tai veden kolmoispisteessä. Tällä menetelmällä mittaustarkkuus on noin $0,2\text{ °C} \dots 2\text{ °C}$ lämpötila-alueesta riippuen.

Parhaaseen tarkkuuteen pääsee anturikohtaisella kalibroinnilla, jossa annetaan anturin poikkeamat standardiarvoista tai lasketaan anturikohtaiset vakiot. Anturin nollapisteen resistanssi on hyvä mitata ennen kalibroinnin aloittamista vaikka nollapiste ei sisältyisi kalibrointipisteisiin. Nollapisteen avulla voidaan seurata anturin stabiiliutta kalibroinnin aikana ja myöhemmin kalibrointien välillä.

Pysyvä muutos R_0 -arvossa merkitsee yleensä, että anturia on käytetty väärin tai sen rakenne on muuttunut. Pysyvien muutoksien syinä voi olla mm. liian korkeat lämpötilat, kosteus anturissa tai oikosulku käämityksessä. Anturi, jossa on suuri pysyvä muutos R_0 -arvossa on poistettava käytöstä epäluotettavana.

Tärinä, mekaaniset iskut ja nopeat lämpötilan muutokset saattavat aiheuttaa muutoksia R_0 -arvossa, jotka yleensä voidaan poistaa hehkuttamalla. Voimakas tärinä voi myös hajottaa anturin niin, että vastuksen lanka katkeaa, jolloin anturi ei lainkaan toimi.

6.3 Lämpötilan laskenta

Liitteessä 2 on esitetty standardin IEC 751 Amendment 2: 1995 laskentakaavat Pt100-anturille kun $R_0 = 100\ \Omega$. Laskenta on jaettu kahteen osaan: $0\text{ °C} \dots 850\text{ °C}$ ja $-200\text{ °C} \dots 0\text{ °C}$. Standardissa on laskentakaavojen lisäksi taulukko Pt100-anturille, mistä vastusarvo voidaan lukea yhden asteen välein.

6.4 Eristysvastus

Eristysvastusmittaus on tärkeä anturin kunnan tarkastustoimenpide. Huono eristysvastus merkitsee oikosulkuvirtoja, jotka pienentävät kokonaisvastusta. Lämpötila-alueella $15 \dots 35\text{ °C}$ ja testijännitteellä $10 \dots 100\text{ VDC}$ eristysvastuksen (jokaisen johtimen ja vaipan) välillä pitää olla vähintään $100\text{ M}\Omega$. Tämän lisäksi eristysvastus mitataan maksimilämpötilassa korkeintaan 10 VDC jännitteellä (OIML suositus R 84 1989).

Taulukko 6.1 Pienin sallittu eristysvastus lämpötilan funktiona

Korkein lämpötila alueella [°C]	Pienin sallittu eristysvastus [MΩ]
100...300	10
301...500	2
501...850	0,5

6.5 Itselämpeneminen

Anturin vastusta mitattaessa kehittää mittausvirta aina jonkin verran lämpöä vastuksessa. Näin ollen anturin ja kohteen välillä syntyy lämpötilaero, joka riippuu *anturin rakenteesta sekä anturin ja kohteen välisestä lämmönsiirtokertoimesta*. Nesteessä itselämpeneminen on huomattavasti pienempi kuin ilmassa tai kaasussa. Väliaineen virtausnopeudella on myös merkitystä.

Nykyisissä laitteissa mittausvirta on yleensä 1 mA tai pienempi. Anturin itselämpenemiskerroin josakin olotilassa annetaan yksikössä °C/mW.

6.6 Vastuksen mittaaminen

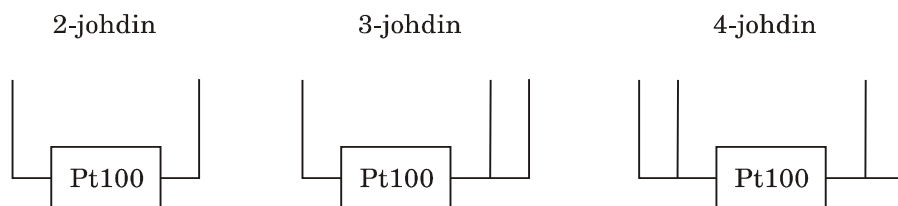
Anturit voivat olla rakenteeltaan 2-, 3- tai 4-johdimisia riippuen siitä millä kytkennällä vastusmittaus on tarkoitus tehdä.

Anturi liitetään mittauslaitteeseen 2-, 3- tai 4-johdinkytkenällä. Johtimena voidaan käyttää hyvälaatuista kuparijohtoa, jonka eristysvastus on riittävän hyvä.

2-johdinkytkenässä johtimen vastus on otettava huomioon mittaustuloksissa. Johtimien vastusmuutokset lämpötilan johdosta aiheuttavat aina epävarmuutta mittaustuloksiin. Kuparin lämpötilakerroin on n. 0,4 %/°C eli samaa suuruusluokkaa kuin platinalla.

Tarkin vastusmittaus tehdään 4-johdinmittauksella, missä virta syötetään toisesta johdinparista ja jännite mitataan toisesta, joka käytännössä on virraton.

Pt100 anturin vastusmittaus



Kuva 6.2. 2-johdinmittauksessa johdivastus on syytä pitää mahdollisimman pienenä. 3-johdinmittauksessa kaikkien johtimien vastusarvo pitää olla yhtä suuri eli johdot yhtä pitkät ja paksut.

6.7 Näyttölaite

Näyttölaitetta hankittaessa kannattaa kiinnittää huomiota seuraaviin asioihin:

- vastuksen mittaustapa (2-, 3- tai 4-johdin)
- näyttölaitteen resoluutio
- kanavien lukumäärä
- mahdollisuus anturin kalibrointikorjauksien tai vakioiden tallentamiseen näyttölaitteen muistiin
- väyläliitäntä (esim. RS232)

Esimerkki 6.1 Pt100-anturin käyttö

Kalibroidulla Pt100-anturilla mitataan tarkkuusvastuksen lämpötilaa. Anturi on upotettu tarkkuusvastuksen keskellä olevaan mittausaukkoon. Lämpötilan tasaisuuden parantamiseksi tarkkuusvastusta pidetään eristetyssä laatikossa. Pt100-anturin vastusta mitataan 4-johtimisesti digitaalisella yleismittarilla. Pt100-anturin vastusarvot muutetaan lämpötilaksi käyttäen standardia IEC 751 Amendment 2 (1995) R_0 -arvolla 100,000 Ω .

Tarkkuusvastuksen lämpötila lasketaan seuraavan kaavan avulla:

$$t_X \cong t_{IEC}(R_{MIT}) + C_S \cdot \delta R_S + \delta t_{CAL} + \delta t_{ERO}$$

$$t_X = t_{IEC}(R_{MIT} + \delta R_S) + \delta t_{CAL} + \delta t_{ERO}$$

missä:

t_{IEC}	IEC 751 standardin laskentakaavaa käyttäen saatu lämpötila
R_{MIT}	mitattu Pt100-anturin vastusarvo
δR_S	digitaalisen yleismittarin kalibrointitodistuksessa annettu vastusarvon korjaus
C_S	vastusarvon herkkyyskerroin
δt_{CAL}	Pt100-anturin kalibrointitodistuksessa annettu korjaus
δt_{ERO}	lämpötilaeroista (tarkkuusvastuksen säilytyslaatikossa) johtuva korjaus

Mittaustulokset:

	vastus [Ω]
1. mittaus	109,850
2. mittaus	109,854
3. mittaus	109,852
4. mittaus	109,853
keskiarvo	109,852
keskiarvon keskihajonta	0,001

Mitattu vastusarvo (R_{MIT}): Pt100-anturin mitattu vastusarvo on $109,852 \Omega$. Standardiepävarmuus on $0,001 \Omega$, $k=1$, normaalijakauma. Standardiepävarmuus $0,001 \Omega$ saadaan muutetuksi lämpötilaksi käyttäen herkkyyskerrointa C_S . Herkkyyskerroin C_S lasketaan standardin IEC 751 taulukkoa tai kaavaa käyttäen. Sen arvo on $2,58 \text{ }^\circ\text{C}/\Omega$.

Digitaalisen yleismittarin kalibrointikorjaus (δR_S): Kalibrointitodistuksen mukaan mittarin korjaus vastusarvolla 110Ω on $-0,009 \Omega$, korjauksen epävarmuus on $0,01 \Omega$, normaalijakauma, $k=2$.

Pt100-anturin kalibrointikorjaus (δt_{CAL}): Kalibrointitodistuksen mukaan anturin korjaus lämpötilassa $25 \text{ }^\circ\text{C}$ on $+0,12 \text{ }^\circ\text{C}$, korjauksen epävarmuus on $0,03 \text{ }^\circ\text{C}$, normaalijakauma, $k=2$.

Lämpötilan tasaisuus (δt_{ERO}): Lämpötilan tasaisuus tarkkuusvastuksen säilytyslaatikossa on mitattu kahdella Pt100-anturilla. Suurin havaittu ero oli $0,25 \text{ }^\circ\text{C}$. Oletetaan tasajakauma jolloin standardiepävarmuus on $0,25/\sqrt{3} \text{ }^\circ\text{C} = 0,14 \text{ }^\circ\text{C}$.

Epävarmuuslaskelma esitetään taulukkomuodossa

Taulukko 6.2

Suure X_i	Arvio x_i	Standardiepävarmuus $u(x_i)$	Jakauma	Herkkyyskerroin C_i	Epävarmuus $u_i(y)$
R_{MIT}	$109,852 \Omega$	$0,001 \Omega$	Normaali	$2,58 \text{ }^\circ\text{C}/\Omega$	$0,003 \text{ }^\circ\text{C}$
δR_S	$-0,009 \Omega$	$0,005 \Omega$	Normaali	$2,58 \text{ }^\circ\text{C}/\Omega$	$0,013 \text{ }^\circ\text{C}$
δt_{CAL}	$0,120 \text{ }^\circ\text{C}$	$0,015 \text{ }^\circ\text{C}$	Normaali	1	$0,015 \text{ }^\circ\text{C}$
δt_{ERO}	$0 \text{ }^\circ\text{C}$	$0,140 \text{ }^\circ\text{C}$	Tasa	1	$0,140 \text{ }^\circ\text{C}$
t_{IEC}	$25,270 \text{ }^\circ\text{C}$				
t_X	$25,390 \text{ }^\circ\text{C}$	Yhdistetty epävarmuus $u(y)$			$0,141 \text{ }^\circ\text{C}$

Lämpötila $t_{IEC} = 25,27 \text{ }^\circ\text{C}$ on laskettu vastusarvosta $(109,852 - 0,009) \Omega = 109,843 \Omega$ IEC 751 standardia käyttäen. Lämpötilaan $25,27 \text{ }^\circ\text{C}$ on vielä lisättävä anturin kalibrointikorjaus $0,12 \text{ }^\circ\text{C}$ eli $t_X = (25,27 + 0,12) \text{ }^\circ\text{C} = 25,39 \text{ }^\circ\text{C}$.

Laajennettu epävarmuus: $U = k \cdot u(y) = 2 \cdot 0,14 \text{ }^\circ\text{C} = 0,28 \text{ }^\circ\text{C}$.

Mittaustulos: $25,39 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,28 \text{ }^\circ\text{C}$.

7. INFRAPUNALÄMPÖMITTARIT

Lämpösäteilyn mittaaminen eli pyrometria on tekniikka, jolla kohteen lämpötilaa mitataan kohdetta koskettamatta käyttäen hyväksi kohteen pinnasta säteilevää energiaa. Säteilyn perustuva tekniikka mahdollistaa lämpötilamittaukset kohteista, joihin tavanomaisten vastusanturien, termistorien ja termoelementtien asentaminen on joko mahdotonta tai ainakin hyvin hankalaa. Tällaisia ovat hyvin korkeat lämpötilat, liikkuvat kohteet, räjähdysvaaralliset ympäristöt, etäällä olevat kohteet ja nopeasti muuttuvat lämpötilat. Kaupallisesti valmistetuilla pyrometreillä voidaan mitata lämpötiloja alueella $-50\text{ °C} \dots +3000\text{ °C}$. Erikoistapauksissa (lämpökamerat) voidaan kohteen lämpötilaa mitata jopa kahden kilometrin etäisyydeltä. Luotettavan mittaustuloksen saavuttamiseksi, vaaditaan hyvää ymmärrystä säteilypyrometrioiden toiminnasta, sekä mitattavan kohteen ominaisuuksista. Jos tutkittavan pinnan ja mittaavan pyrometrin välillä vaikuttavia häiritseviä säteilylähteitä (esim. auringonvalo) ei huomioida tai käytetään väärän tyyppistä pyrometriä, voi mittaustulos olla hyvin epäluotettava.



Kuva 7.1. Erilaisia pyrometrejä

7.1. Lämpösäteily

Kaikki kohteet lähettävät lämpösäteilyä, joka on tulosta atomien lämpöliikkeestä, ja säteilyn voimakkuus riippuu lämpötilasta. Infrapunapyrometri mittaa tätä voimakkuutta valitulla aallonpituudella tai aallonpituuskaistalla tai vertaa sitä referenssilähteeseen ja mahdollistaa näin ollen kohteen lämpötilan määrittämisen.

Mustan kappaleen säteilijä on ideaalinen säteilijä, joka absorboi kaiken siihen tulevan säteilyn, ei läpäise eikä heijasta sitä, vaan säteilee pintansa lämpötilaan verrannollista lämpösäteilyä.

Säteilyenergian ja lämpötilan riippuvuuteen toisistaan vaikuttavat myös mitattavan pinnan ominaisuudet, kuten pinnan karheus ja materiaali. Näitä pinnan ominaisuuksia kuvaa termi emissiokerroin (emissiivisyys). Emissiokerroin on kappaleen tietyssä lämpötilassa lähettämän lämpösäteilyn ja

samassa lämpötilassa olevan mustankappaleen lämpösäteilyn suhde, jonka arvo täytyy olla nollan ja yhden (musta kappale) välillä.

Pinnan emissiokerroin on riippuvainen myös aallonpituudesta, pinnan lämpötilasta, säteilykulmasta, pinnan käsittelystä (kiillotettu tai karhennettu) ja kunnosta (oksidoitunut tai päällystetty) ja sen arvo voi näin ollen muuttua ajan funktiona.

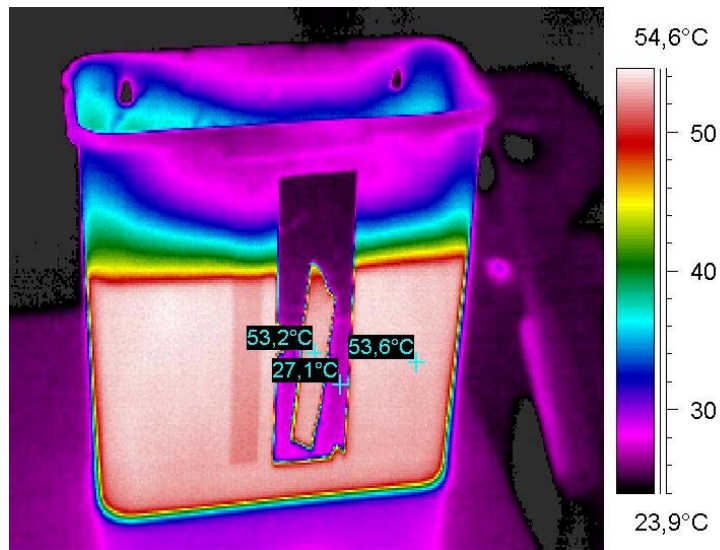
Yksi merkittävimmistä ongelmista monien aineiden lämpösäteilymittauksissa on tuntematon tai muuttuva emissiokertoimen arvo. Tämä täytyy tietää valittaessa ja käytettäessä säteilypyrometriä.

Käytännön pyrometreissa suoritetaan emissiokertoimen korjaus mitattavan pinnan emissiivisyyden mukaan. Tätä varten on olemassa taulukoita, joista löytyy useimpien materiaalien emissiokertoimien arvot (Taulukko 7.1). Joissakin tapauksissa täytyy emissiokertoimen arvo selvittää tapauskohtaisesti.

Taulukko 7.1 Muutamien aineiden tyypillisiä emissiokertoimia

Materiaali	Emissiokerroin (ϵ)
Teräs	0,35
Teräs (oksidoitunut)	0,85
Ruostumaton teräs	0,30
Ruostumaton teräs (vähän oksidoitunut)	0,40
Ruostumaton teräs (oksidoitunut)	0,80
Kupari	0,06
Kupari (oksidoitunut)	0,80
Alumiini	0,13
Alumiini (oksidoitunut)	0,40
Tiili	0,85
Asfaltti	0,85
Iho	0,99
Vesi (syvyys yli 50 mm)	0,95
Puu	0,85

Huom: Jo yhden prosentin virhe emissiivisyydessä aiheuttaa jopa 60 asteen virheen lämpötilassa 3000 °C (Taulukko 7.2).



Kuva 7.2 a Lämpökameralla otettu kuva. Kuvassa on lämpimällä vedellä osittain täytetty muoviastia, jonka etupintaan on kiinnitetty mustaa teippiä ja alumiiniteippiä ja alumiiniteipin päälle maalarinteippiä.



Kuva 7.2 b. Digitaalikameralla otettu kuva samasta kohteesta

Kuva 7.2. Lämpökameramittauksen avulla toteutettu havaintoesimerkki mitattavan pinnan emissiokertoimen vaikutuksesta lämpötilalukemaan (kuva 7.2.a) ja digitaalinen valokuva samasta kohteesta (kuva 7.2 b).

Taulukko 7.2 Lämpötilavirhe (°C) joka johtuu 1 %:n emissiivisyysvirheestä

keskimääräinen aallonpituus [μm]	0,65	0,9	1,64	2,3	3,4	3,9	4,5	5,0	7,9	10,6	0,78-1,06
lämpötila (°C)											
-50									1,8	1,3	
0									0,3	0,3	
50				0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	
100			0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,6	
200			0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	1,1	1,2	
300			0,4	0,5	0,8	0,9	1,0	1,1	1,6	1,9	
400		0,3	0,5	0,7	1,1	1,2	1,4	1,5	2,2	2,6	
500		0,4	0,7	1,0	1,4	1,6	1,8	2,0	2,9	3,3	
750		0,7	1,1	1,7	2,5	2,8	3,1	3,4	4,7	5,3	12,2
1000	0,7	1,1	1,7	2,5	3,7	4,1	4,6	5,0	6,7	7,4	15,3
1500	1,4	1,8	2,7	4,3	6,2	6,7	7,4	7,9	10,1	10,9	21,3
2000	2,3	3,3	4,8	7,6	10,4	11,2	12,1	12,8	15,5	16,5	33,1
2500	3,5	4,9	6,9	10,8	14,3	15,2	16,3	17,1	20,2	21,2	45,4
3000	4,8	6,7	9,3	14,3	18,4	19,5	20,7	21,6	24,9	26,0	59,9

7.2. Mittarin rakenne

Normaali pyrometri muodostuu *optiikasta, ilmaisimesta ja elektroniikasta*, jolla muodostetaan lämpötilaan verrannollinen sähköinen signaali.

Hyvin suunniteltu pyrometri on rakennettu siten, että lämpösäteily kerätään mahdollisimman tehokkaasti ilmaisimelle. Tämä merkitsee sitä että häiriöt nimellisen näköalueen ulkopuolelta on eliminoitu, tai häiriölähteestä aiheutuvat virheet on kompensoitu ja optisella suodattimella on erotettu haluttu aallonpituuskaista.

Yleisimmin käytetyt optiikat ovat linssi- ja kuituoptiikka

Linssi-optiikat

Lasilinssit ovat normaalisti soveltuvia lyhyille aallonpituuksille, mutta lämpötiloille, joissa vaaditaan pitempiä aallonpituuksia ei läpäisykyky ole riittävä vaan tarvitaan muita materiaaleja. Tärkeää on pitää optiset pinnat vapaana pölystä ja liasta.

Kuituoptiikat

Joissakin sovelluksissa pienikokoisillakaan mittalaitteilla ei mittauskohdetta päästä tarkastelemaan tavanomaisilla optiikkajärjestelmillä. Asennuspaikka voi olla ahdas, kuuma, epäpuhtauksia sisältävä tai räjähdysvaarallinen eikä käytettävissä ole esim. jäähdytysvettä. Näihin kohteisiin löytyy ratkaisu kuituoptiikkaa käyttävistä rakenteista. Optinen mittapää voidaan sijoittaa jopa lämpötilaan 315 °C ilman jäähdytystä ja lämpösäteilyenergia siirretään optisella kuidulla suotuisampaan ympäristöön sijoitettuun vahvistimeen. Kuituoptisen mittauksen haittana pitkillä aallonpituuksilla on heikko optinen teho, mistä syystä kuidun pään tulee olla lähellä mittauskohdetta. Kuituoptiikat soveltuvat käytännössä parhaiten yli 300 °C lämpötilojen mittauksiin.

Ilmaisimet

Käytettävä ilmaisintyyppi määräytyy lähinnä mitattavan lämpötila-alueen mukaan. Yleisimmät ilmaisintyytit ovat Si-, Ge-, PbSe-, HgCdTe-, termopatsas- ja pyroelektrinen ilmaisim.

7.3 Yleisimmät infrapunälämpömittarien tyypit

Kokonaissäteilypyrometrit

Kokonaissäteilypyrometrit ovat laitteita jotka vastaanottavat lämpösäteilyä suhteellisen laajalta aallon-pituusalueelta. Käytännössä alue rajoittuu yleensä välille 1 µm ...100 µm. Ilmaisimina (detektoreina) käytetään usein termoelementtejä, joita herkkyyden parantamiseksi on kytketty sarjaan. Detektorin toimintatavan mukaisesti tyyppi on hidas, tavallisin vasteaika on 1...3 sekuntia.

Laajan aallonpituusalueen omaavana pyrometri on altis erilaisille säteilystä ja mittausolosuhteista johtuville häiriöille. Myös emissiokertoimen epävarmuus aiheuttaa huomattavia virheitä mittaustuloksiin.

Osittaissäteilypyrometrit

Osittaissäteilypyrometrit ovat laitteita, jotka suodattimien ja ilmaisimien avulla keräävät säteilyä hyvin kapealta aallonpituusalueelta. Tällaisia ovat esimerkiksi piidetektorilla varustetut pyrometrit, joiden aallonpituusalue on välillä 0,5 µm ...1,1 µm. Piidetektorin käyttö säteilypyrometrissä perustuu sen suureen herkkyyteen ja stabiiliuteen. Piidetektorilla varustetulla osittaissäteilypyrometreillä päästään tyyppillisesti muutaman millisekunnin luokkaa olevaan vasteaikaan. Nopeutensa vuoksi se soveltuu myös nopeasti liikkuvien kappaleiden lämpötilan mittaamiseen. Emissiokertoimen epävarmuuden aiheuttama mittausrvirhe on kokonaissäteilypyrometreihin verrattuna suhteellisen vähäinen.

Suhdepyrometrit (2-väripyrometrit)

Suhdepyrometrit mittaavat säteilyä kahdella toisiaan lähellä olevalla aallonpituudella, säteilyn voimakkuuden ilmaisesta lämpötilan. Itse asiassa laite koostuu kahdesta osittaissäteilypyrometristä. Säteilijän emissiokertoimen ollessa riippumaton aallonpituudesta (harmaa säteilijä) ilmoittaa suhdepyrometri todellisen lämpötilan. Käytännössä suhdepyrometri on erittäin herkkä aallonpituuden mukaan tapahtuville emissiokertoimen vaihteluille ja näin ollen voi aiheuttaa suuren mittausrvirheen.

Lämpökamerat

Lämpökamerat ovat lämpösäteilymittausten erikoissovelluksia. Uusimmat lämpökamerat käyttävät pyrometristä poiketen yhden ilmaisimen sijasta ilmaisimatriisiä (FPA, Focal Plane Array). Matriisi-ilmaisimia on kahden tyyppisiä: jäähdytettyjä ja jäähdyttämättömiä. Jäähdyttämättömien matriisien ongelmana on satunnaislämpökohina ja pitkä vasteaika. Lämpökamerat toimivat valmiiksi spesifioidulla mittauskaistalla (lyhyt- tai pitkäaaltoinen infrapunakaista) lämpötilan erottelukyvyn ollessa parhaimmillaan alle 0,1 astetta. Täydellinen kuva mittauskohteesta muodostetaan samalla tavalla kuin televisiokuvassa. Kamerat ovat käyttökelpoisia määrittelemään "kuumia pisteitä" sähköpiireissä, lämpöhäviöitä rakennuksissa, tukoksia putkistoissa jne. Joka tapauksessa päätarkoitus on hakea lämpötilaeroja, vaikkakin todellinen lämpötila-arvo on myös kiinnostava. Nykyaikainen lämpökamera ja sitä tukeva ohjelmisto antavat mahdollisuuden käyttää lämpökameraa esimerkiksi säännöllisin väliajoin suoritettavaan kunnonvalvontaan ja muutosten seurantaan trendien muodossa. Tällä tavalla käytettynä lämpökamera täydentää ja tehostaa merkittävästi perinteistä kunnonvalvontaa.

IR-skanneri

Skannaava infrapunapyrometri eli IR-skanneri koostuu esim. pyrometristä ja sen edessä pyörivästä peilistä. Tällaisia laitteita käytetään mm. liikkuvan teräs- tai lasilinjan lämpötilaprofiilin mittaamiseen.

7.4. Infrapunälämpömittarin valinta

Yleensä ottaen kaikkein tarkimpiin käytännön mittauksiin lämpötila-alueella 20 °C...3000 °C voidaan suositella mahdollisimman lyhyellä ja kapealla aallonpituudella toimivaa osittaissäteilypyrometriä. Sillä on hyvin nopea vasteaika ja se on mainiosti automaattisiin prosessin säätöjärjestelmiin soveltuva mittausinstrumentti.

Optimi aallonpituuskaista määräytyy luonnollisesti kiinnostavimman lämpötila-alueen mukaan, ja detektorin valinta suoritetaan sen mukaan.

Toinen tärkeä seikka aallonpituusaluetta valittaessa on ilman laatu, joka on mitattavan pinnan ja mittausinstrumentin välillä. Normaali ilma sisältää suhteellisen pieniä määriä hiilidioksidia ja muuttuvan määrän vesihöyryä. Tyypillisesti käytettyjä aallonpituusalueita ovat 0,65 µm...1,0 µm, 3 µm...5 µm, 3,9 µm, 4,8 µm ...5,2 µm, 7,9 µm ja 8 µm...14 µm.

Esimerkiksi erilaisissa polttouuneissa suhteellisen korkeiden lämpötilojen (1300 °C) mittaamiseen käytetään tyypillisesti 3,9 µm aallonpituutta, jota eivät uunin polttoaineesta palamistuotteina vapautuvat kaasut herkästi häiritse.

Kolmas tärkeä seikka on mitattavan *kohdealueen koko*. Eri pyrometriä valmistajat ilmoittavat kohdealueen koon eri tavalla. On huomattava, että yleensä pyrometrit näkevät jonkin verran myös ilmoitetun kohdealueen ulkopuolelta tulevaa säteilyä, ja eri valmistajien optiikkojen laadussa voi olla suuriakin eroja.

Alhaisten lämpötilojen mittauksessa on vaikea erottaa signaalia taustasäteilystä, tämän vuoksi täytyy ilmaisimia jäähdyttää. Termopatsasilmaisimet ovat yleisesti käytettyjä, joskin ne ovat erittäin hitaita. Toinen yleisesti käytetty on pyroelektrinen ilmaisin, jolla lämpötilan nousu muutetaan sähköiseksi varaukseksi.

Suhdepyrometrin (2-väri pyrometrin) käyttöön on syytä mennä vain sellaisissa poikkeustapauksissa joissa mitattavan kohteen emissiokerroin vaihtelee suuresti, mitattava kohde täyttää vain osan mitattaavan pyrometrin näkökentästä, tai atmosfääri on sellainen että pyrometrin linssin likaantumista ei voida estää. Suhdepyrometrin käyttö rajoittuu näissä erikoistapauksissakin vain korkeille lämpötiloille.

On huomattavaa, että mitattaessa pintoja, joilla on lähes ideaalinen absorptiokyky (harmaa säteilijä) ei suhdepyrometrin emissiokorjausta tarvitse muuttaa arvosta 1. On kuitenkin paljon materiaaleja, joiden emissiokerroin on riippuvainen sekä aallonpituudesta, että lämpötilasta (esim. kupari), jolloin myös emissiosuhde muuttuu lämpötilan mukana. Näissä tapauksissa tarkan lämpötilamittauksen suorittaminen 2-väripyrometrillä vaatii huolellisia testauksia ennen kuin emissiokorjaussäätö saadaan viritettyä oikeaksi. Pienikin virhe emissiivisyyden korjauksessa voi aiheuttaa suuren mitausvirheen.

7.5. Kiinteäasenteisen pyrometrin käyttö

Teollisuuden likaisissa mittaussovelluksissa kiinteästi asennettava pyrometri vaatii yleensä suojavaipan, johon tuodaan puhdas instrumentti-ilma suojaamaan pyrometrin elektroniikkaa ylikuumenemiseltä ja estämään optiikan likaantumista. Pursotusilman määrää on hyvä säätää esimerkiksi virtausrotametrin avulla. Tyypillinen ilmamäärä on 20...40 l/min.

Erittäin kuumissa kohteissa joudutaan pyrometri lisäksi suojaamaan ylikuumenemiseltä suojavaipassa kierrätettävän veden avulla.

Mittausjärjestelmää käyttöön otettaessa täytyy pyrometri kohdistaa ja fokusoida hyvin mitattavaan kohteeseen. Pyrometrin asemointi täytyy suunnitella siten, että optiikka ei joudu alttiiksi mittauskohteen ulkopuolelta tuleville heijastuksille jotka vääristävät mittauksia. Jos heijastuksilta ei voida välttyä (esim. läpityöntouunit), täytyy joissakin tapauksissa mitata heijastavan kohteen lämpötila ja suorittaa laskentayksikön avulla korjaus mittaussignaaliin.

Pyrometrin näkökentässä mittauskohteeseen ei saa olla esteitä. Suora optinen kohdistus on normaalisti mahdollista tehdä pyrometrin läpinäkyvän kohdistusikkunan avulla. Myös lasersädetä käytetään yhä enemmän kohdistuksen apuna. Valo lähetetään käyttämällä samaa optiikkaa kuin itse mittauksessakin. Yhtä sädetä käytettäessä tämä osoittaa vain mittauksen keskipisteen. Kahden säteen tekniikalla voidaan tarkemmin määrittää todellinen mittausalue.

Kiinteään käyttöön suunnitellut säteilylämpömittarit kohdistetaan normaalisti vain mittauksen asennusvaiheessa ja niiden asemointiin ei enää sen jälkeen ole tarvetta. Kohdistus on syytä tehdä huolellisesti varsinkin, jos mitattava kohde on pieni tai liikkuva.

Suosittelavaa on että mitattava kohde on halkaisijaltaan vähintään kaksi kertaa pyrometrin näköalueen nimellishalkaisija. Käytettäessä 2-väri pyrometriä, voidaan mitata suhteellisen luotettavasti myös näköalueen nimellishalkaisijaa pienempiä kohteita.

Esimerkki 7.1 Käsipyrometrin käyttö

Käytännön mittausesimerkiksi voidaan ottaa terästehtaan aihionvalmistuksessa ennakkohuoltomittauksena tapahtuva kuuman teräsaihion lämpötilan mittaus valukoneen jälkeen. Mittalaitteena käytetään käsipyrometriä. Mittausolosuhteet vaihtelevat ulkoilman lämpötilan ja kosteuden mukaan. Mitattavan aihion leveys vaihtelee vähän alle metristä lähes 1,5 metriin. Aihion nopeus on noin 1 m/min. Mittauksen tarkoituksena on varmistaa vaikeissa olosuhteissa mittaavien kiinteiden pyrometrimittausten toimintakunto.

Mittauslaitteen valinta

Koska mitattava lämpötila oli korkea, valittiin käsipyrometriksi lyhyellä aallonpituudella toimiva piidetektorilla varustettu pyrometri, jolla voidaan mitata lämpötiloja yli 600 °C. Mitattavan kohteen emissiokerroin oli suhteellisen vakaa ja hyvin hallittu ($\varepsilon = 0,84 \dots 0,85$).

Mittaustapahtuma

Pyrometri kohdistettiin aihion keskikohtaan 4...5 metrin etäisyydeltä noin 45 asteen kulmassa aihion pintaan nähden. Pyrometri asetettiin mittaamaan lämpötilan huippuarvoa, koska aihion pinnassa esiintyy jäähtyessään hilsettä, joka kylmenee teräsaihion pintalämpötilaa nopeammin.

Mittaustulosten käsittely

Luettiin pyrometrin näytöltä lämpötilalukema 10 kertaa ja kirjattiin ylös. Mittaustulosten keskiarvoksi saatiin 1052 °C. Mittausarvosta vähennettiin käsipyrometrin voimassa olevan kalibroitodistuksen ilmoittama näyttämävirhe -2 °C (lämpötilassa 1050 °C; virhe -2 °C vähennetään arvosta 1050 °C). Näin mitatuksi aihion lämpötilaksi saatiin 1054 °C.

$$t_{\text{aihio}} = t_{\text{mitattu}} + \delta t_{\text{pyres}} - \delta t_{\text{pykorj}} + \delta t_{\text{pytemp}} + \delta t_{\text{pyhilse}}$$

missä:

t_{aihio} mitattavan aihion pinnan lämpötila

t_{mitattu} käsipyrometrin näyttämä (kymmenen mittauksen keskiarvo)

δt_{pyres} käsipyrometrin resoluutiosta johtuva korjaus (resoluutio 1 °C)

δt_{pykorj} käsipyrometrin näyttämävirheestä johtuva korjaus (saadaan voimassa olevasta kalibroitodistuksesta)

δt_{pytemp} käsipyrometrin sisäisen lämpötilan muutoksesta aiheutuva korjaus (pyrometrin valmistajan ilmoittama). Pyrometrin sisäinen lämpötila muuttuu käytettäessä pyrometriä erilaisessa ympäristön lämpötilassa. Tästä aiheutuu virhettä pyrometrin näyttämään.

$\delta t_{\text{pyhilse}}$ aihion pinnalta irronneen hilseen aiheuttama korjaus. Aihion pinnan nopeasta jäähtymisestä seuraa hilseen irtoamista. Hilse jäähtyy irrotessaan teräsaihion pintaa nopeammin.

Epävarmuustekijät

t_{mitattu} on 1052 °C keskihajonnalla 1 °C.

δt_{pyres} Pyrometrin resoluution ollessa 1 °C (vaihteluväli $\pm 0,5$ °C) on standardiepävarmuus 0,29 °C.

δt_{pykorj} Käsipyrometrin voimassa olevassa kalibrointitodistuksessa on ilmoitettu pyrometrin näyttämävirheeksi -2 °C ja sen epävarmuus on ± 4 °C ($k=2$).

δt_{pytemp} Valmistajan ilmoittama arvio pyrometrin sisäisen lämpötilan muutoksen vaikutuksesta pyrometriin on 1 °C. Standardiepävarmuus on 0,58 °C.

$\delta t_{\text{pyhilse}}$ Aihion pinnalta irronneen hilseen epävarmuudeksi arvioidaan 10 °C. Standardiepävarmuus on täten 5,77 °C.

Epävarmuuslaskelma

Suure X_i	Arvio x_i	Standardiepävarmuus $u(x_i)$	Jakauma	Herkkyyskerroin C_i	Epävarmuus $u_i(y)$ $= C_i \cdot u(x_i)$
t_{mitattu}	1052 °C	1 °C	normaali	1	1 °C
δt_{pyres}	0 °C	0,29 °C	tasa	1	0,29 °C
δt_{pykorj}	-2 °C	2 °C	normaali	-1	-2 °C
δt_{pytemp}	0 °C	0,58 °C	tasa	1	0,58 °C
$\delta t_{\text{pyhilse}}$	0 °C	5,77 °C	tasa	1	5,77 °C
t_{aihio}	1054 °C			yhdistetty epävarmuus	6,22 °C

Laajennettu epävarmuus: $U = k \cdot u(t_{\text{aihio}}) = 2 \cdot 6,22 \text{ °C} = 12,44 \text{ °C}$

Tulos: Mitattu aihion lämpötila 1054 \pm 12 °C

8. KANNETTAVAT UUNIT (BLOCK CALIBRATORS)

Nykyään on saatavana pienikokoisia kannettavia uunirakenteisia lämpötilakalibraattoreita (kuva 8.1). Malleissa, joissa on sisäänrakennettu jäähdytys pääsee reilusti pakkasen puolelle myös normaaleissa sisälämpötiloissa.



Kuva 8.1 Kannettavia uuneja

Uuni koostuu yleensä lämmityslohkosta, jossa on upokas antureita varten, lämpötilan säätöyksiköistä ja säätävän anturin lämpötilanäytöstä. On malleja, joihin voidaan kytkeä erillinen lämpötila-anturi, jolla on oma näyttö.

Upotussyvyys on usein suhteellisen pieni (100 mm...150 mm), joten lämmönjohtavuus anturiin pitää olla hyvä. Suosituksena on, että upotussyvyys on vähintään 15 kertaa anturin halkaisija ja *anturin halkaisija korkeintaan 6 mm*. Malleissa joissa on vaihdettavia upokkaita on valittava sopiva upokas. Lämpötila-alueella $-80\text{ °C}...+660\text{ °C}$ suositus on, että upokkaan sisähalkaisijan ja anturin halkaisijan erotus ei ole suurempi kuin 0,5 mm ja alueella $660\text{ °C}...1300\text{ °C}$ alle 1,0 mm. Korkeissa lämpötiloissa voi käyttää lisäeristystä upokkaan yläpuolella, esim. eristysvillalla täytettyä metalliputkea. On syytä noudattaa valmistajan suosituksia lisäeristeen suhteen. Jos lisäeristystä on käytetty uunin kalibroinnissa on siitä mainittava kalibrointitodistuksessa.

*Suositus on, että lämpötila on riittävän tasainen 40 mm alueella pystysuunnassa. Yleensä upokkaan pohjasta ylöspäin. Tätä aluetta sanotaan **mittaussyöhykkeeksi**. Jos mittaalue sijoittuu eri alueelle kuin pohjasta ylöspäin on tästä erikseen mainittava.*

8.1 Kalibrointi

Kun kalibraattori tulee ensi kerran kalibrointiin tehdään *perus (ensi) kalibrointi (initial calibration)*, jossa tarkemmin selvitetään lämpötilan tasaisuutta mittausalueessa. *Seuraavat kalibroinnit (repeat calibration)* voidaan tehdä hieman kevyemmin jos tiedot peruskalibroinnista on olemassa. Mikäli seuraavan kalibroinnin tulokset poikkeavat peruskalibroinnin tuloksista enemmän kuin kalibrointi-epävarmuus on peruskalibrointi uusittava.

Lämpötilan tasaisuus pystysuunnassa

Lämpötilan tasaisuus pystysuunnassa mitataan anturilla, jonka anturielementin pituus on korkeintaan 5 mm. On suositeltavaa käyttää Pt vastusanturia alueella -80...+660 °C ja jalometallitermoelementtiä alueella +660...1300 °C. Perusmetallitermoelementit eivät sovellu näihin mittauksiin.

Mitataan seuraavasti:

- 1) anturi upokkaan pohjassa
- 2) anturi nostettu 20 mm pohjasta
- 3) anturi nostettu 40 mm pohjasta
- 4) anturi upokkaan pohjassa

Mittaukset tehdään upokkaan keskellä olevasta reiästä tai erikseen merkitystä reiästä.

Peruskalibrointi: Mittaukset suoritetaan korkeimmassa ja matalimmassa lämpötilassa Mikäli jokin näistä lämpötiloista on huoneenlämpötila, lisätään tai vähennetään 20 °C tästä lämpötilasta.

Seuraavat kalibroinnit: Mittaukset suoritetaan siinä lämpötilassa, joka poikkeaa eniten huoneen lämpötilasta.

Lämpötilaerot mittausreikien välillä

Mikäli upokkaassa on useampia mittausreikiä, on reikien väliset lämpötilaerot selvitettävä. Mittaukset on hyvä tehdä kahdella anturilla, jotta lämpötilan ajalliset muutokset eivät vaikuttaisi tuloksiin.

Mittaukset suoritetaan vähintään kolmessa mittausreiässä, jotka jakautuvat mahdollisimman tasaisesti upokkaan ulkoreunalle. Jos mittaukset tehdään kalibroimattomilla antureilla on antureita vaihdettava keskenään. Näin voidaan laskea antureiden näyttämien erotus kun ne ovat samassa lämpötilassa.

Seuraavat kalibroinnit: Mittaukset suoritetaan kahdesta eniten peruskalibroinnissa poikkeavasta mittausreiästä.

Lämpökuorman vaikutus mittausalueen lämpötilaan

Peruskalibrointi: Tällä testillä selvitetään lämpökuorman vaikutusta referenssianturin ja vertailuanturin lämpötilaeroon. Lisäkuormana olevien antureiden tai anturivaippojen on ulottuva vähintään 200 mm upokkaan yläpuolelle. Mittaukset suoritetaan lämpötilassa, joka poikkeaa eniten huoneen lämpötilasta.

Seuraavat kalibroinnit: Lämpökuormamittauksia ei vaadita.

Ajallinen lämpötilan tasaisuus

Sen jälkeen kun lämpötila on tasaantunut mitataan lämpötilan vaihteluväli 30 min aikana.

Peruskalibrointi ja seuraavat kalibroinnit:

Mittaukset suoritetaan kolmessa lämpötilassa: korkein lämpötila, matalin lämpötila ja huoneen lämpötila. Mikäli korkein tai matalin lämpötila on lähellä huoneen lämpötilaa, valitaan kolmas testi-lämpötila alueen keskikohdasta.

Lisätietoja: EA-10/13 Guidelines on the Calibration of Temperature Block calibrators

Esimerkki 8.1 Kalibrointituloksen laskenta

Lämpötilakalibraattori tarkastettiin lämpötila-alueella +50 °...+500 °C kalibroidun Pt25-anturin avulla kun anturi oli asetettu kalibraattorin upokkaaseen pohjaan asti. Pt25-anturin vastus mitattiin automaattisen AC mittasillan ja referenssivastuksen avulla. Korkeimmassa lämpötilassa tutkittiin lämpötilan tasaisuutta pystysuunnassa nostamalla anturia ensi 20 mm ja sitten 40 mm. Upokkaan keskellä oli vain yksi mittausreikä ja näin ollen ei lämpötilan tasaisuusmittaus eri reikien välillä tule kyseeseen tässä tapauksessa. Laskevalla lämpötilalla mitattiin +300 °C ja +50 °C välittömästi +500 °C jälkeen. Kalibroinnin aikana käytettiin valmistajan suosituksen mukaisesti eristysvillalla täytettyä, halkaisijaltaan 30 mm ja pituudeltaan 200 mm, putkea lisäeristeenä upokkaan yläpuolella. Upokkaan reiän halkaisija oli 6 mm ja anturin suojavaipan halkaisija 5,7 mm.

Mittaustulokset

Taulukko 8.1 Mittaustulokset uunin asetusarvon funktiona

Kalibrointiuuni s/n (sarjanumero)				
Lämpötila t_{90} [°C]	Uuninasetus [°C]	Uunin näyttämä [°C]	Korjaus t_{90} -näyttämä [°C]	Upotussyvyys [mm]
50,17	50,0	50,0	+0,17	100
100,13	100,0	100,0	+0,13	100
200,16	200,0	200,0	+0,16	100
300,08	300,0	300,0	+0,08	100
400,04	400,0	400,0	+0,04	100
499,97	500,0	500,0	-0,03	100
500,72	500,0	500,0	+0,72	80
500,01	500,0	500,0	+0,01	60
300,14	300,0	300,0	+0,14	100
50,15	50,0	50,0	+0,15	100

Lämpötila t_x upokkaan mittausvyöhykkeellä lasketaan seuraavan kaavan avulla:

$$t_x = t_s + \delta t_s + \delta t_D + \delta t_{iX} + \delta t_H + \delta t_B + \delta t_V$$

missä:

t_S	lämpötilanormaalin (Pt25) lukema
δt_S	mittasillasta ja referenssivastuksesta johtuva korjaus
δt_D	Pt25-anturin ryöminnästä johtuva korjaus (viimeisen kalibroinnin jälkeen)
δt_{IX}	kalibroitavan uunin näytön resoluutiosta johtuva korjaus
δt_H	nousevien ja laskevien lämpötilojen hystereesistä johtuva korjaus
δt_B	uunin lämpötilan tasaisuudesta (pystysuunnassa) johtuva korjaus
δt_V	uunin lämpötilan ajallisesta tasaisuudesta johtuva korjaus

Pt25-anturi (t_S): anturin kalibroitiepävarmuus on
 0,01 °C kun lämpötila on < 300 °C
 0,08 °C kun lämpötila on 300 °C ... <420 °C
 0,15 °C kun lämpötila on 420 °C ... 550 °C
 normaalijakauma, $k=2$

Mittasilta ja referenssivastus (δt_S): Mittasillasta ja referenssivastuksesta johtuva epävarmuus on arvioitu olevan pienempi kuin 0,01 °C, tasajakauma.

Pt25-anturin stabiilius (t_D): Anturin ryömintä kalibrointien välillä oletetaan olevan pienempi kuin 0,01 °C, tasajakauma, kun anturin veden kolmoispistearvoa seurataan säännöllisesti.

Kalibroitavan uunin näytön resoluutio ja lukeman tasaisuus (t_{IX}): Uunin näytön askelarvo on 0,1 °C. Oletetaan pyöristysepävarmuudeksi puolet askelarvosta eli 0,05 °C, tasajakauma. Uunin näytön lukemassa ei esiintynyt huojuunaa, lukema pysyi asetusarvossa.

Hystereesi (t_H): Lämpötilat 50 ja 300 °C on mitattu nousevalla ja laskevalla lämpötilalla. Hystereesi voidaan laskea virheiden erotuksesta. Lämpötilassa 50 °C hystereesi on (0,15 - 0,17) °C = -0,02 °C ja lämpötilassa 300 °C (0,14 - 0,08) °C = 0,06 °C. Hystereesin epävarmuudeksi arvioidaan 0,06 °C, tasajakauma, standardiepävarmuus $0,06/\sqrt{3}$ °C = 0,035 °C. Näin hieman yliarvioidaan hystereesin vaikutusta matalilla ja korkeilla lämpötiloilla.

Kalibroitavan uunin lämpötilan tasaisuus pystysuunnassa (t_B): Lämpötilan tasaisuutta pystysuunnassa tutkittiin lämpötilassa 500 °C nostamalla Pt25-anturia ensin 20 ja sitten 40 mm pohjasta. Epävarmuudeksi arvioitiin 0,75 °C. Tämä on korjauksien erotus upotussyvyyksillä 80 ja 100 mm. Havaittu epävarmuus oletetaan riippuvan lineaarisesti lämpötilasta, $0,75$ °C/(500-20) °C = 0,00156. Näin saadaan lämpötilasta riippuvainen epävarmuustekijä 0,156% (lukema -20 °C). Oletetaan tasainen jakauma eli $0,156\%/\sqrt{3} = 0,09\%$.

Kalibroitavan uunin lämpötilan ajallinen tasaisuus (t_V): Uunin lämpötilan ajallista tasaisuutta seurataan lämpötilanormaalina toimivan Pt25-anturin avulla. Lämpötilan ajallisen tasaisuuden standardiepävarmuudeksi arvioitiin 0,03 °C ($k=1$), normaali jakauma.

Esimerkkinä lasketaan epävarmuus lämpötilassa 300 °C:

Taulukko 8.2 Epävarmuuskomponentit

Suure X_i	Arvio x_i	Standardi- epävarmuus $u(x_i)$	Jakauma	Herkkyys- kerroin C_i	Epävarmuus $u_i(y)=C_i \cdot u(x_i)$
t_S	300,08 °C	0,040 °C	normaali	1	0,040 °C
δt_S	0 °C	0,006 °C	tasa	1	0,006 °C
δt_D	0 °C	0,006 °C	tasa	1	0,006 °C
δt_{iX}	0 °C	0,029 °C	tasa	1	0,029 °C
δt_H	0 °C	0,035 °C	tasa	1	0,035 °C
δt_B	0 °C	0,252 °C	tasa	1	0,252 °C
δt_V	0 °C	0,030 °C	normaali	1	0,030 °C
Yhdistetty epävarmuus $u(y)$					0,261 °C

Laajennettu epävarmuus: $U = k \cdot u(y) = 2 \cdot 0,261 \text{ °C} = 0,52 \text{ °C}$

Muille lämpötiloille epävarmuus voidaan laskea vastaavalla tavalla.

Laajennettu epävarmuus kaikille mitatuille lämpötiloille:

Taulukko 8.3 Mittaustulokset

Uunin asetus [°C]	Lämpötila t_{90} [°C]	Kalibroinnin epävarmuus [°C] ($k = 2$)
50,00	50,17	0,12
100,00	100,13	0,18
200,00	200,16	0,34
300,00	300,08	0,52
400,00	400,04	0,70
500,00	499,97	0,88

9. LÄMPÖKAAPIT JA AUTOKLAAVIT

Lämpökaapin lämpötilan mittaamisessa on osittain samat ongelmat kuin edellisessä kappaleessa kuvatuun kalibrointiuunin lämpötilan mittaamisessa. Molemmissa lämpötilajakauma johtuu kuormituksesta: millaisia lämpömittareita laitetaan kalibrointiuunin onkaloihin, tai miten täynnä tavaroita lämpökaappi on.

Koska lämpökaapin eri kohdissa (ylhäällä, alhaalla, keskellä, nurkissa) saattaa olla eri lämpötiloja ja kaapin lämmitysjärjestelmäkin saattaa muuttaa lämpötilan jaksolliseksi, pitäisi mieluummin käyttää monikanavaista lämpömittaria kaapin tutkimukseen. Tähän lämpömittariin hankitaan esim. 5 kpl K-tyypin termoelementtejä, jotka kalibroidaan digitaalisen mittarin kanssa. On olemassa hyvin ohutta K-tyypin termoelementtilankaa, joka mahtuu kaapin oven väliin, kun se suljetaan. Anturit sijoitetaan sopiviin kohtiin, esim. ensin alimmalle hyllylle kulmiin ja keskelle. Kaappiin kannattaa myös laittaa tavarat. Mittaus suoritetaan kun kaapin lämpötila on tasaantunut oven sulkemisen jälkeen. Sitten lämpömittarit siirretään samoihin kohtiin seuraavalle hyllylle jne. Esim. keskihyllyllä voidaan tehdä pitempi mittaus, josta lämpötilan huojunta käy ilmi.

Autoklaavi muodostuu suljetusta paineistetusta tilasta, minkä lämpötilakin on säädettävissä. Autoklaavissa on myös vesihöyryä. Autoklaavien lämpötilan on ylitettävä se lämpötila, missä bakteerit ja muut pieneliöt kuolevat. Monessa autoklaavissa on läpivientiaukko, josta kenttäkalibrointitilanteessa voi pujottaa mittanormaalit autoklaavin sisään. Mittanormaaleja valittaessa on otettava niiden paineensietokyky huomioon. Mittanormaalit on kalibroitava ennen kuin ne asetetaan autoklaaviin ja myös kun ne on otettu sieltä pois.

Autoklaavi on laite jolla steriloidaan esim. sairaalainstrumenttejä, -vaatteita yms. kuivakyllästettyä vesihöyryä käyttäen. Sterilointilämpötiloina käytetään yleensä joko 134,0 °C / 7 min (minimivaatimus 3 min) tai 121,0 °C / 20 min (minimivaatimus 16,5 min). Prosessin alussa lämpötila säädetään paineen avulla. Yllämainittuja lämpötilalukemia vastaavat painelukemat ovat noin 3,1 bar abs ja 2,1 bar abs. Steriilifaasin lämpötila kontrolloidaan Pt100-vastusanturilla.

Tarkasteltavana olevan autoklaavin säätävänä elementtinä on Pt100-vastusanturi, joka sijaitsee autoklaavin pohjassa vesihöyryn poistoaukossa. Toinen Pt100-anturi on autoklaavin vaippaosassa. Sen avulla seurataan autoklaavin vaipan lämpötilan tasaisuutta. Lämpötilalukemat kummastakin anturista saadaan 0,1 tehdään täydellä resoluutiolla. Oletetaan näyttämän pyöristyvän lähimpään täyteen askeleeseen, pyöristysvirhe on siten enintään puolet näytön resoluutiosta. Kun tästä johtuva epävarmuus oletetaan tasan jakautuneeksi, on standardiepävarmuus on $0,05/\sqrt{3}$ °C.

Autoklaavin validoinnissa tehdään mm. seuraavat toimenpiteet:

- autoklaavin Pt100-antureiden kalibrointi
- lämpötilan tasaisuusmittauksessa käytettävien T-tyypin termoelementtilankojen kalibrointi
- lämpötilan tasaisuusmittaus T-tyypin termoelementtilankojen avulla (tyhjässä kammiossa), anturit on sijoitettu nurkkiin ja poistoaukkoon, yhteensä 10 kpl
- lopputesti kuorman kanssa, T-tyypin langat on sijoitettu kuormaan ja tyhjän kammion testissä havaittuun kylmimpään nurkkaan, yhteensä 12 kpl antureita
- T-tyypin lankojen verifiointi testien jälkeen

Esimerkki 9.1 Autoklaavin lämpötila-antureiden kalibrointi

Pt100-anturit kalibroidaan pienessä kannettavassa öljyhauteessa lämpötiloissa 120 °C ja 136 °C. Referenssinormaalina käytetään Pt100-anturilla toimivaa mittauslaitteistoa, jonka kalibrointiepävarmuus on 0,02 °C, $k=2$ (normaalijakauma). Lämpötilan tasaisuus öljyhauteessa on $\pm 0,03$ °C, tasajakauma, standardiepävarmuus $0,03/\sqrt{3}$ °C. Autoklaavin Pt100-antureiden lukemaa ei säädetä mikäli virhe on rajoissa $\pm 0,5$ °C.

Tasaisuusmittauksessa käytettävät T-tyyppin langat tarkistetaan kannettavassa kuiva-uunissa, jonka lämpötilan tasaisuus on $\pm 0,1$ °C, tasajakauma, standardiepävarmuus $0,1/\sqrt{3}$ °C. T-tyyppin langat hyväksytään käytettäväksi tasaisuusmittauksessa mikäli suurimman ja pienimmän lukeman ero on korkeintaan 0,3 °C. Absoluuttisella virheellä ei ole merkitystä. T-tyyppin mittauksessa käytettävän mittauslaitteiston resoluutio on 0,05 °C. Oletetaan näyttämän pyöristyvän lähimpään täyteen askeleeseen, pyöristysvirhe on siten enintään puolet näytön askelarovasta. Kun tästä johtuva epävarmuus oletetaan tasan jakautuneeksi, on standardiepävarmuus $0,025/\sqrt{3}$ °C.

T-tyyppin langat on kytketty kylmäpistekompensoituun relekorttiin. Relekortin lämpötilan tasaisuudeksi oletetaan $\pm 0,1$ °C, tasajakauma, standardiepävarmuus $0,1/\sqrt{3}$ °C.

Epävarmuustekijät

1. Autoklaavin Pt100-mittauslaitteiston resoluutiosta johtuva epävarmuus on 0,05 °C, tasainen jakauma, standardiepävarmuus $0,05/\sqrt{3}$ °C. Tämä tekijä tulee mukaan kahteen kertaan, Pt100-antureiden kalibroinnissa ja lopputestissä.
2. Autoklaavin Pt100-antureiden kalibroinnissa käytetyn mittanormaalin kalibrointiepävarmuus on kalibrointitodistuksen mukaan 0,02 °C ($k=2$), normaalijakauma.
3. Autoklaavin Pt100-antureiden kalibroinnissa käytetyn öljyhauteen lämpötilan tasaisuus on $\pm 0,03$ °C, tasajakauma, standardiepävarmuus $0,03/\sqrt{3}$ °C.
4. T-tyyppin lankojen mittauslaitteiston resoluutiosta johtuva epävarmuus on 0,025 °C, tasajakauma, standardiepävarmuus $0,025/\sqrt{3}$ °C. Tämä tekijä tulee kahteen kertaan, T-tyyppin lankojen kalibroinnissa ja lopputestissä.
5. T-tyyppin lankojen mittauslaitteiston kylmäpistekompensoidun relekortin lämpötilan tasaisuuden epävarmuus on $\pm 0,1$ °C, tasajakauma, standardiepävarmuus $0,1/\sqrt{3}$ °C. Liitoksien lämpötilojen oletetaan olevan noin 21 °C. T-tyyppin Seebeck arvo lämpötilassa 21 °C on 40,3 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ja lämpötilassa 134 °C 49,2 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$. Näistä saadaan herkkyyksikertoimeksi $40,3/49,2 = 0,82$.
6. T-tyyppin lankojen kalibrointiuunin lämpötilan tasaisuuden epävarmuus on $\pm 0,1$ °C, tasajakauma, standardiepävarmuus $0,1/\sqrt{3}$ °C.

Epävarmuuslaskelma esitetään taulukkomuodossa

Taulukko 9.1 Epävarmuustekijät

Epävarmuustekijä	Standardi- epävarmuus $u(x_i)$	Jakauma	Herkkyyskerroin C_i	Epävarmuus $u_i(y)=C_i \cdot u(x_i)$
1. Pt100, erotuskyky, kalibrointi	0,029 °C	tasa	1	0,029 °C
Pt100, erotuskyky, lopputesti	0,029 °C	tasa	1	0,029 °C
2. Mittanormaali, kalibrointiepävarmuus	0,010 °C	normaali	1	0,010 °C
3. Öljyhaude, tasaisuus	0,017 °C	tasa	1	0,017 °C
4. T-tyyppi, erotuskyky, kalibrointi	0,014 °C	tasa	1	0,014 °C
T-tyyppi, erotuskyky, lopputesti	0,014 °C	tasa	1	0,014 °C
5. T-tyyppi, komp., kalibrointi	0,058 °C	tasa	0,820	0,047 °C
T-tyyppi, komp, lopputesti	0,058 °C	tasa	0,820	0,047 °C
6. Kalibrointiuuni, tasaisuus	0,058 °C	tasa	1	0,058 °C
Yhdistetty epävarmuus $u(y)$				0,106 °C

Laajennettu epävarmuus: $U = k \cdot u(y) = 2 \cdot 0,106 \text{ °C} \approx 0,21 \text{ °C}$

Mikä on pienin asetusarvo jos mittauksien kokonaisepävarmuus on 0,21 °C ja tavoitteena on vähintään lämpötila 134 °C kun Pt100-antureille sallitaan virherajat $\pm 0,5 \text{ °C}$ ja T-tyypin langoille enintään 0,3 °C keskinäistä eroa? Pahin tapaus on että Pt100-antureiden virhe on -0,5 °C ja T-tyypin lankojen suurin keskinäinen poikkeama 0,3 °C. Tällöin korjaamaton systemaattinen virhe saattaa olla -0,8 °C, johon vielä pitäisi lisätä tasaisuusmittauksessa havaittu suurin poikkeama. Tähän lukemaan on liitettävä epävarmuus 0,21 °C. Tästä voidaan päätellä, että asetusarvon on oltava vähintään 135 °C, mieluummin hieman suurempi. Toinen tapa on pienentää Pt100-antureiden virhetoleransseja, varsinkin alaspäin, esimerkiksi -0,3...+0,7 °C, jolloin asetusarvoa voi pienentää.

Lisätietoja:

NATA (National Association of Testing Authorities; Australia), Technical Note 12, June 1991: Measurement of Temperature Variation and Recovery Time in Laboratory Drying Ovens

Autoklaavi: NATA Technical Note 5 January 1992: Monitoring of Laboratory Steam Sterilisers

SANAS Laboratories: Drying oven on-site calibration, Audit report, Neville Robinson, 1998

Normalisation Française, XP X 15-149 Mai 1999: Enceintes climatiques et thermostatiques

CEI-IEC 68-2-66, First edition 1994-06 Environmental testing-Part 2: Test methods-Test Cx: Damp heat, steady state (unsaturated pressurized vapour)

Public Draft 1 + amendments 6.7.1999 (ed. S. Bell): A guide to calculating the uncertainty of the performance of environmental chambers

10. PINTALÄMPÖMITTARIT

Pintalämpömittari on yleensä termoelementti tai vastusanturi, jonka mittapää on tehty niin, että se saa mahdollisimman hyvän lämpökontaktin mitattavaan pintaan. Yleensä pintalämpömittari on kytketty digitaaliseen näyttölaitteeseen.



Kuva 10.1 Erityyppisiä pintalämpömittareita ja oikealla infrapunamittari, jolla myös pystyy mittaamaan pinnan lämpötilaa.

Vaikka pintalämpömittari siis koostuu tavallisesta lämpötila-anturista riippuu pintalämpömittarin mittausepävarmuus sen käyttötavasta. Kun se on upotettu mitattavaan aineeseen, on mittausepävarmuus sama kuin vastaavanlaisen puikkoanturin epävarmuus. Kun pintalämpömittarilla mitataan kappaleen pinnan lämpötilaa, saattaa mittausepävarmuus olla moninkertainen edelliseen tapaukseen verrattuna.

Yleinen väärinkäsitys on, että esim. putkessa virtaavan nesteen lämpötilaa voidaan mitata putken ulkopintaan kiinnitetyn pintalämpömittarin avulla (tai infrapunälämpömittarin avulla). Tämä onnistuu vain, jos on kehitetty tähän mittaustilanteeseen tehty malli, jonka mukaan lasketaan virtaavan nesteen lämpötila, kun putken pinnan lämpötila on tiedossa.

Tästä eteenpäin käsitellään vain pinnan lämpötilan mittauksia.

Kappaleen pinta on monessa suhteessa vaikea mittaussubjekti. Sen lämpötila muodostuu sekä kappaleen sisällä vallitsevasta lämpötilasta sekä kappaletta ympäröivän aineen, yleensä ilman lämpötilasta. Jos ilma vielä liikkuu pinnan ohi (*konvektio*) vaikeutuu mittaustilanne entisestään. Pinta myös luovuttaa energiaa lämpösäteilyn muodossa. Pintalämpömittari vaikuttaa itsekin pinnan lämpötilaan, koska pintalämpömittari johtaa lämpöä pinnasta pois, jos pinnan lämpötila on korkeampi kuin ilman lämpötila, tai sitten se lämmittää pintaa, jos kyseessä on kylmä pinta.

Pintalämpömittarin mittausrvirhe saattaa esim. lämpötilassa 300 °C olla muutamia kymmeniä asteita, jos mittaolosuhteet ovat huonot.

Esimerkki 10.1 Kappaleen pinnan lämpötilan mittaaminen

Malli

Kirjoitetaan pinnan lämpötilalle malli: pinnan lämpötila = pintalämpömittarin näyttämä + kalibrointitodistuksessa oleva korjaus. Lämpömittarissa tapahtuva johtuminen saattaa alentaa pinnan lämpötilaa, ja huono kosketus mittarin ja pinnan välillä alentaa lämpömittarin näyttämää. Myös pinnan ohi virtaava ilma saattaa muuttaa pinnan alkulämpötilaa, mutta silloin mitataan tätä muuttunutta lämpötilaa. Tuulen muuttuva suunta tai nopeus saattaa lisätä mittauksen epävarmuutta, mutta se näkyy mittaustulosten hajonnassa. Jos todella haluaa tietää pinnan lämpötilan tynellä ilmalla, täytyy tehdä tämä konvektiosta johtuva korjaus. Pinta myös säteilee jatkuvasti, ja se alentaa koko ajan pinnan lämpötilaa kunnes se on saavuttanut ympäristön lämpötilan, ellei siihen tuoda lisää lämpöä. Alla olevassa mallissa tätä säteilyä ei oteta huomioon (oletetaan että mitattava pinta on sellaisen putken pinta, jossa virtaa lämmin neste, ja että pintaan tulee nesteestä yhtä paljon lämpöä kuin mitä pinnalta säteilee pois). Mittarin erotuskyky vaikuttaa mittauksen lopputulokseen. Aurinko saattaa lämmittää putken etupintaa, mutta takapinta on kylmempi, ja sen lämpötila edustaa silloin paremmin putken lämpötilaa.

$$t_{\text{pinta}} = t_{\text{mittari}} + \delta t_{\text{kal}} + \delta t_{\text{pinta}} + \delta t_{\text{joht}} + \delta t_{\text{kosk}} + \delta t_{\text{erotusk}}$$

Tässä

t_{pinta}	on pinnan lämpötila
t_{mittari}	on pintalämpömittarin näyttämä
δt_{kal}	on pintalämpömittarin kalibrointitodistuksessa oleva korjaus
δt_{pinta}	on pinnan lämpötilan huojunnasta johtuva korjaus
δt_{joht}	on pintalämpömittarin lämmönjohtavuudesta johtuva korjaus
δt_{kosk}	on pintalämpömittarin kosketuksesta johtuva korjaus
$\delta t_{\text{erotusk}}$	on pintalämpömittarin digitaalinäytön erotuskyvystä (resoluutio) johtuva korjaus

Mittaustulos

Pinnan lämpötilaa mitataan kalibroidulla pintalämpömittarilla, jonka näytön erotuskyky on 0,1 °C. Mittaria painetaan pintaa vastaan kohtisuorasti ja odotetaan kunnes mittarin näyttämä on stabiloitunut. Mittausta toistetaan esim. 8 kertaa nostamatta mittaria pinnalta.

Mittarin näyttämä (°C):

294,8	294,7
294,9	294,7
294,8	294,9
294,8	294,7

Keskiarvo on 294,79 °C ja keskiarvon keskihajonta 0,08 °C.

Epävarmuustekijät

Mittarin kalibrointitodistuksesta käy ilmi, että lämpötilassa 290 °C on korjaus -4,2 °C standardiepävarmuudella ($k = 2$) 2,0 °C.

Pinnan lämpötilan huojunnasta aiheutuvan korjauksen arvioidaan olevan 0 °C standardiepävarmuudella 0,12 °C ($k = 2$).

Pintalämpömittarin johtumisesta aiheutuva korjaus on 3,5 °C standardiepävarmuudella 0,5 °C ($k = 2$).

Pintalämpömittarin kosketuksesta johtuva korjaus on 0,2 °C standardiepävarmuudella 0,24 °C ($k = 2$).

Epävarmuuden laskenta

Taulukko 10.1

Suure X_i	Arvio x_i	Standardiepävarmuus $u(x_i)$	Jakauma	Herkkyyskerroin C_i	Epävarmuus $u_i(y) = C_i \cdot u(x_i)$
t_{mittari}	294,79 °C	0,08 °C	normaali	1	0,08 °C
δt_{kal}	-4,2 °C	1,0 °C	normaali	1	1,0 °C
δt_{pinta}	0 °C	0,06 °C	normaali	1	0,06 °C
δt_{joht}	3,5 °C	0,25 °C	normaali	1	0,25 °C
δt_{kosk}	0,2 °C	0,12 °C	normaali	1	0,12 °C
$\delta t_{\text{erotusk}}$	0 °C	0,06 °C	normaali	1	0,06 °C
t_{pinta}	290,59 °C				$(0,08^2 + 1,0^2 + \dots)^{1/2} \text{ °C} = 1,044 \text{ °C}$

Laajennettu epävarmuus = $2 \times 1,044 \text{ °C} \approx 2,1 \text{ °C}$

Pinnan lämpötila on 294,3 °C \pm 2,1 °C.

Huom: jos lämmönsiirto pinnan materiaalin ja mittarin materiaalin välillä on pieni, voidaan saada hyvinkin virheellisiä tuloksia, esimerkki: Ruostumattomalle teräslevylle on kiinnitetty kupari-konstantaani-lämpömittari. Kun lämpömittari näyttää 200 °C, on pinnan lämpötila 227 °C. Jos pinta onkin posliinia ja lämpömittari edelleen näyttäisi 200 °C, olisi pinnan lämpötila 365 °C!

Lisätietoja:

Calibration of Contacting Sensors for Temperature Measurement on Surfaces, Frank Bernhard, Silke Augustin, Helge Mammen, Klaus-Dieter Sommer, Erich Tegeler, Mathias Wagner, Ullrich Demisch, Peter Trageser, Tempmeko '99 Proceedings pp. 257-262

Lämpötilan vertailumittaus L9: Pintalämpömittareiden kalibrointi, Thua Weckström, Mittatekniikan keskuksen julkaisu J15/1997

Proceedings of the IMEKO TC-12 Workshop on Surface Thermal Measurements, Budapest, Hungary, November 7-9,1995

Nordtest 951-91: Direct-Reading Contact Thermometers: Calibration (s. 10/16)

Kirk D. Hagen, Heat Transfer with Applications, Prentice Hall, Inc. ISBN 0-13-520941-2

11. DIGITAALILÄMPÖMITTARIN JA KALIBRAATTORIN SÄHKÖINEN KALIBROINTI

Termoelementeille tarkoitettua digitaalilämpömittaria voidaan kalibroida sähköisesti syöttämällä siihen jännite, joka vastaa termoelementin tuottamaa sähkömotorista voimaa (termoelementin simulointi) tai kytkemällä vastuslämpömittareille tarkoitettu digitaalimittari dekadivastukseen (vastusanturin simulointi). Lisäksi tarvitaan jännitemittari tai vastusmittari ja termoelementtien tai vastusantureiden referenssitaulukot (vastusanturit: CEI/IEC 751: 1995, termoelementit: CEI/IEC 584-1: 1995).

Kalibraattori on tässä yhteydessä lämpötilänäytöllä varustettu laite joka tuottaa valittua lämpötilaa vastaavan sähkösignaalin.

11.1 Kylmän pään kompensointi

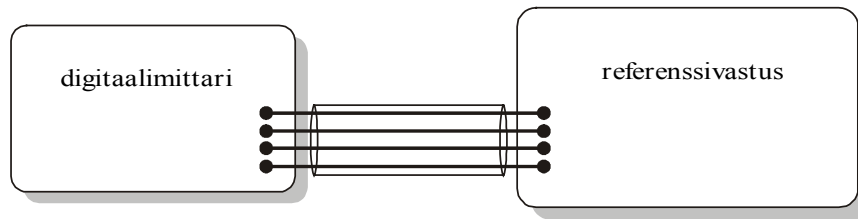
Jos termoelementin tuottama sähkömotorinen voima (jännite) halutaan kytkeä jännitemittarin, ei termoelementin johtoja voida suoraan liittää jännitemittariin, vaan johdot liitetään kuparijohtoihin, jotka sitten liitetään jännitemittariin. Termoelementtijohtojen ja kuparijohtojen liitoskohtaa pidetään jäähauteessa lämpötilassa 0 °C. IEC:n referenssitaulukot on tehty olettaen, että liitoskohta on lämpötilassa 0 °C.

Digitaalilämpömittari sisältää mittauspiirin, joka mittaa mittausjohtojen kiinnityskohdan lämpötilan. Digitaalilämpömittari lisää tätä lämpötilaa vastaavan termojännitteen mitattuun jännitteeseen, ja sen jälkeen se laskee lämpötilan referenssitaulukoiden mukaisesti (KPK = kylmän pään kompensointi).

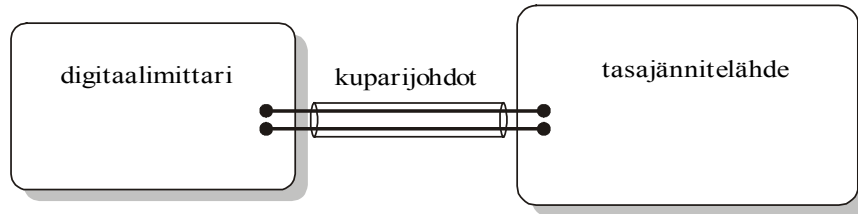
11.2 Kalibroinnissa tarvittavat laitteet

Taulukko 11.1

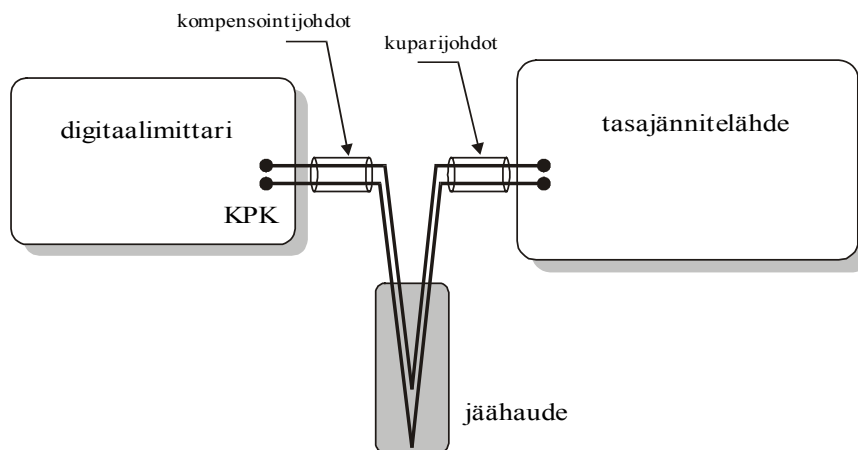
Kalibroitava laite	Anturityyppi	Referenssinormaali	Mittauskytkentä	Selitys kappaleessa
digitaalimit-tari	vastuslämpö-mittari	referenssivastukset tai dekadivastus	Kuva 11.1	11.2.1, 11.2.2 ja 11.2.3
digitaalimit-tari	termoelementti (ei KPK)	tasajännitelähde	Kuva 11.2	11.2.1, 11.2.3 ja 11.2.9
digitaalimit-tari	termoelementti (KPK)	tasajännitelähde, kalibroitu termoelementti, jäähaude	Kuva 11.3	11.2.1, 11.2.4, 11.2.5, 11.2.6, 11.2.8 ja 11.2.9
kalibraattori	vastuslämpö-mittari	vastusmittari	Kuva 11.4	11.2.1, 11.2.3 ja 11.2.7
kalibraattori	termoelementti (ei KPK)	tasajännitemittari	Kuva 11.5	11.2.1, 11.2.3 ja 11.2.9
kalibraattori	termoelementti (KPK)	tasajännitemittari, kalibroitu termoelementti, jäähaude	Kuva 11.6	11.2.1, 11.2.4, 11.2.5, 11.2.6, 11.2.8 ja 11.2.9



Kuva 11.1

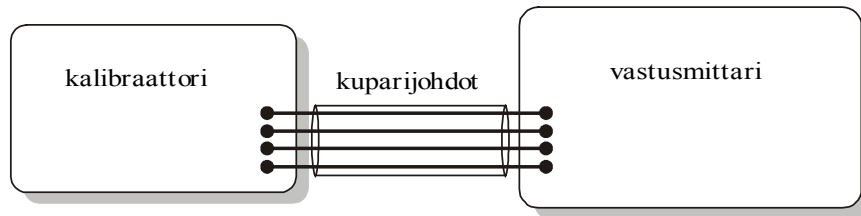


Kuva 11.2

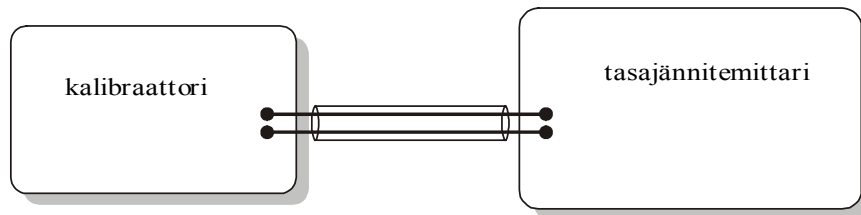


Kuva 11.3

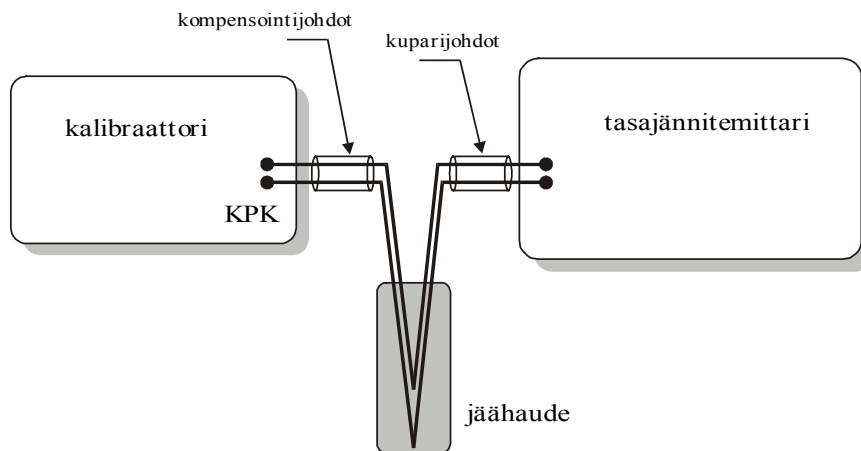
Kuva 11.1, 11.2 ja 11.3. Lämpötilanäytöllä varustetun digitaalimittarin kalibrointi jännitelähteen avulla, KPK = kylmän pään kompensointi



Kuva 11.4



Kuva 11.5



Kuva 11.6

Kuva 11.4, 11.5 ja 11.6 Kalibraattorin kalibrointi, KPK = kylmän pään kompensointi

Kalibroinnissa käytettävät normaalit pitää olla kalibroitu.

Referenssivastuksen tai dekadivastuksen kytkentä digitaalimittariin riippuu siitä, onko tarkoituksena käyttää 2-, 3- tai 4-johdinkytkentää käytännön mittauksissa. Kuvassa 11.4 on käytetty 4-johdinkytkentää. Mittausjohtojen tuottama mittausvirhe 2-johdinkytkennässä voidaan joko korjata tai liittää mittausepävarmuuteen.

Kytkenässä tulee käyttää hyvänlaatuisia kuparijohtimia.

Liitoskohdan lämpötilan stabilointi voidaan toteuttaa usealla eri tavalla. Jäätapiste on helppo toteuttaa. Sen tyypillinen standardiepävarmuus on n. 0,0025 °C. Myös hyvin eristetty kuparikappale huoneen lämpötilassa saattaa olla hyvinkin stabiili, mutta sen lämpötila tulee mitata kalibroidulla antu-

rilla. Löytyy myös laitteita, jossa on sähköisesti toteutettu 0 °C:een tasku. Tämän lämpötila ja sen stabiilius on testattava ennen käyttöä.

Digitaalilämpömittari tai kalibraattori, jota käytetään termoelementtimittauksille, kytketään jännitelähteeseen/jännitemittariin termoelementin avulla (kuva 11.3). Termoelementtiin ei kytketä kompensointijohtoja, vaan käytetään samanlaisia jatkojohtoja kuin itse termoelementti, jonka toinen pää on referenssilämpötilassa. Termoelementti tulee olla kalibroitu välillä 0 °C (referenssilämpötila) ... 40 °C (jännitelähteen tai jännitemittarin lämpötila). Poikkeamat termoelementtien IEC-aulukosta liitetään joko epävarmuuteen, tai sitten ne huomioidaan digitaalilämpömittarin tai kalibraattorin mittaustuloksissa.

Ennen kalibrointia tarkistetaan, että termoelementin navat on kytketty oikein.

Kytettäessä vastusmittaria kalibraattoriin täytyy huomioida, onko kyseessä 2-, 3- tai 4-johdinkytkentä. Kuvassa 11.4 on käytetty 4-johdinkytkentää.

Termoelementtijohtimien sähköisen eristyksen on oltava kunnossa.

Kytkentä on suoritettava niin, että piiriin ei synny satunnaisia sähkömotorisia voimia.

11.3 Kalibroinnin tulosten kirjoittaminen

Todistuksessa pitää mainita, minkä lämpötila-asteikon mukaisesti kalibrointi on suoritettu (esim. ITS-90).

Jos kalibroitu laite on digitaalilämpömittari, tulisi todistuksessa mainita syötetyt jännitearvot/vastusarvot, vastaavat IEC-aulukon mukaiset lämpötilat, ja digitaalilämpömittarin osoitus. Jos kalibroitu laite on kalibraattori, pitää todistuksesta käydä ilmi kalibraattorin asetusarvot (°C) ja vastaavat IEC-aulukon mukaiset arvot, sekä jännitemittauksen tulos.

Todistuksesta tulisi käydä ilmi, että kalibrointi suoritettiin simulointimenetelmällä, tai kalibraattorin kohdalla, että kyseessä oli sähköinen kalibrointi.

Käytetyt IEC-standardien numerot ja versiot tulisi mainita todistuksessa.

Jos laite pystyy mittaamaan tai simuloimaan monta eri anturityyppiä, pitäisi nämä käydä selvästi ilmi todistuksesta.

Jos laitteessa on kylmän pään kompensointi joka voi olla joko käytössä tai ei käytössä, voidaan kalibrointitodistus kirjoittaa molemmille tilanteille.

Esimerkki 11.1 Digitaalimittariin kytketyn termoelementin epävarmuuden laskenta

Tässä esimerkissä käsitellään digitaalilämpömittaria, jota käytetään S-tyyppin termoelementin kanssa.

Kalibroinnissa käytettiin kuvassa 11.3 oleva kytkentä. Jännitelähteen kalibrointi oli voimassa. Termoelementtijohtimet oli kalibroitu lämpötila-alueella 18 °C... 40 °C. Kalibrointitilan lämpötila kalibrointihetkellä oli 23 °C ± 1 °C.

Digitaalilämpömittarin resoluutio oli 0,1 °C, eli näytössä on 1 desimaali.

Kalibrointitulokset

Taulukko 11.2 Kalibroinnin tulokset

Kalibrointilämpötila	Vastaava mV-asetus*	Digitaalimittarin osoitus
1000 °C	9586,2 μV	999,8 °C

*Jännitteen asetusarvo haetaan S-tyyppin termoelementin IEC-aulukosta kohdasta 1000 °C (9587,1 μV). Jännitteessä 9586,2 μV on mukana termoelementtijohtimien korjaus (9587,1 μV – 0,9 μV).

Mittausmalli

Kalibroinnissa halutaan tietää minkälainen korjaus K pitäisi liittää digitaalimittarin osoitukseen t_i , kun kalibroinnissa käytetyn termoelementin mittauspää on lämpötilassa t' :

$$K = t' - (t_i - \delta t_i) \quad (1)$$

missä δt_i on digitaalimittarin resoluutiosta johtuva korjaus.

Termoelementtijohtimet tuovat digitaalimittarin napoihin jännitteen:

$$V = E(0 \text{ °C}, t') - E(0 \text{ °C}, t'') \quad (2)$$

missä t'' on digitaalilämpömittarin napojen lämpötila ja E on termoelementin IEC-aulukoiden mukainen jännite lämpötiloissa t' ja t'' .

Tässä kalibroinnissa on kuitenkin termoelementin tuottama jännite korvattu jännitelähteen ja termoelementtijohtimien tuottamalla jännitteellä:

$$V = V_X + \delta V_{X2} + \delta V_{X3} + \delta V_p - [(E(0 \text{ °C}, t'') + \delta E_{c1}(0 \text{ °C}, t'') + \delta E_{c2}(0 \text{ °C}, t''))] + \delta t_{T3} \cdot S_0 \quad (3)$$

missä

V_X on jännitelähteen tuottama jännite asetusarvolla X

δV_{X2} on jännitelähteen tuottaman jännitteen edellisen kalibroinnin mukainen korjaus asetusarvolla X

δV_{X3} on jännitelähteen tuottaman jännitteen korjaus (esim. tilapäinen ryömintä tai ympäristön lämpötilan muutos)

δV_p on loisjännitteistä johtuva korjaus

$\delta E_{c1}(0^\circ\text{C}, t'')$ on termoelementtijohtimien tuottaman smv:n edellisen kalibroinnin mukainen poikkeama standardiarvosta lämpötilassa t''

$\delta E_{c2}(0^\circ\text{C}, t'')$ on termojohdinten edellisen kalibroinnin jälkeinen ryömintä δV_p on loisjännitteistä johtuva korjaus

S_{1000} on S-typin termoelementin Seebeck-kerroin lämpötilassa 1000°C

δt_{T3} on referenssilämpötilan poikkeama lämpötilasta 0°C

S_0 on Seebeck-kerroin lämpötilassa 0°C

Kun sijoitetaan V :n lauseke yhtälöstä (3) yhtälöön (2) saadaan jännitteelle $E(0^\circ\text{C}, t')$ seuraava lauseke:

$$E(0^\circ\text{C}, t') = V_x + \delta V_{x2} + \delta V_{x3} + \delta V_p - (\delta E_{c1}(0^\circ\text{C}, t'') + \delta E_{c2}(0^\circ\text{C}, t'')) + \delta t_{T3} \cdot S_0 \quad (4)$$

Tästä ratkaistaan t' :

$$\begin{aligned} t' &= P[E(0^\circ\text{C}, t')] = P[V_x + \delta V_{x2} + \delta V_{x3} + \delta V_p - [\delta E_{c1}(0^\circ\text{C}, t'') + \delta E_{c2}(0^\circ\text{C}, t'')] + \delta t_{T3} \cdot S_0] \\ &\approx P(V_x) + [\delta V_{x2} - \delta E_{c1}(0^\circ\text{C}, t'') + \delta V_{x3} + \delta V_p - \delta E_{c2}(0^\circ\text{C}, t'') + \delta t_{T3} \cdot S_0] / S_{1000} \end{aligned} \quad (5)$$

Lopuksi sijoitetaan t' :n lauseke yhtälöön (1), jolloin saadaan K :lle lauseke:

$$K = P(V_x) + [\delta V_{x2} - \delta E_{c1}(0^\circ\text{C}, t'') + \delta V_{x3} + \delta V_p - \delta E_{c2}(0^\circ\text{C}, t'') - \delta t_{T3} \cdot S_0] / S_{1000} - (t_i + \delta t_i)$$

Tässä

P on referenssifunktion käänteisfunktio S-typin termoelementille

$P(V_x)$ on jännitelähteen napajännitettä vastaava lämpötila jännitteen asetusarvolla X

t_i on digitaalilämpömittarin näyttämä

δt_i on digitaalimittarin näytön äärellisestä resoluutiosta johtuva korjaus

S-tyyppin termoelementin herkkyykertoimet (Seebeck-kertoimet) ovat

Taulukko 11.3

$t/^\circ\text{C}$	$S_t/\mu\text{V}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$
0	$S_0 = 5,4$
30 (t'')	$S_{30} = 6,0$
1000 (t')	$S_{1000} = 11,5$

Epävarmuusbudjetin osatekijät

Jännitelähteen tuottama jännite (V_x): Oletetaan, että jännitelähteen napajännite on yhtä suuri kuin jännitteen asetusarvo jännitelähteen näytön resoluution asettamien rajoitusten sisällä. Koska jännitelähteen resoluutio on $1 \mu\text{V}$, ovat nämä rajat $\pm 0,5 \mu\text{V}$, ja vastaava standardiepävarmuus on siten $0,29 \mu\text{V}$.

Jännitelähteen kalibrointi (δV_{x2}): Jännitelähteen jännitekorjaus ja vastaava epävarmuus saadaan kalibrointitodistuksesta. Korjaus on $0 \mu\text{V}$ ja laajennettu epävarmuus kattavuuskertoimella $k = 2$ on $\pm 1 \mu\text{V}$. Aikaisempien kalibrointien perusteella tiedetään, että laitteen ryömintä on pienempi kuin sen epävarmuus, joten sitä ei täällä oteta huomioon.

Vaikutustekijät (δV_{x3}): Erillisiä arvoja kaikille jännitelähteen syöttämän jännitteen vaikutustekijöille ei yleensä ole olemassa, mutta ne saattavat löytyä yhteen arvoon niputettuina esim. valmistajan tarkkuusspesifikaatioissa. Korjauksen oletetaan olevan 0 syötetyn jännitteen arvolla S , jonka epävarmuusrajat ovat $\pm 3 \mu\text{V}$. Vastaava standardiepävarmuus on $1,73 \mu\text{V}$.

Loisjännitteet (δV_p): Loisjännitteistä johtuva korjaus on $0 \mu\text{V} \pm 2 \mu\text{V}$. Vastaava standardiepävarmuus on $1,15 \mu\text{V}$.

Termoelementtijohtimien kalibrointi ($\delta E_{e1}(0^\circ\text{C}, t'')$): Termoelementtijohtimien tuottama smv vastaa digitaalilämpömittarin input-napojen lämpötilaa. Tätä lämpötilaa ei mitata, mutta oletetaan sen olevan välillä $23^\circ\text{C} \dots 30^\circ\text{C}$. Vastaavat smv-arvot (ilman korjauksia) ovat välillä $131 \mu\text{V} \dots 173 \mu\text{V}$. Termoelementtijohtimien kalibrointitodistuksesta käy ilmi, että mitatun smv:n poikkeama standardiarvoista on $-0,9 \mu\text{V}$ ($-0,15^\circ\text{C}$) laajennetulla epävarmuudella ($k = 2$) $1,5 \mu\text{V}$ ($0,25^\circ\text{C}$).

Termoelementtijohtimien kalibrointiarvojen ryömintä ($\delta E_{e2}(0^\circ\text{C}, t'')$): Termoelementtijohtimien kalibrointien seuranta osoittaa, että ryömintä on $0,0^\circ\text{C}$ rajojen $0,6 \mu\text{V}$ ($0,1^\circ\text{C}$) sisällä. Vastava standardiepävarmuus on $0,34 \mu\text{V}$ ($0,058^\circ\text{C}$).

Kylmän pään lämpötila (δt_{T3}): Referenssiliitoksen lämpötila on jääpiste: $0,0^\circ\text{C}$, standardiepävarmuudella $0,03^\circ\text{C}$, joka vastaa jännitettä $0,03^\circ\text{C} \times 5,4 \mu\text{V}/^\circ\text{C} = 0,162 \mu\text{V}$. Lämpötilassa 1000°C $0,162 \mu\text{V}$ vastaa lämpötilaa $0,162 \mu\text{V}/(11,5 \mu\text{V}/^\circ\text{C}) = 0,014^\circ\text{C}$. Herkkyykkerroin on siten $0,014/0,03 = 0,467$.

Digitaalimittarin resoluutio (δt_i): Digitaalimittarin resoluutio on $0,1^\circ\text{C}$, ja vaihteluväli $\pm 0,05^\circ\text{C}$. Standardiepävarmuus on täten $0,029^\circ\text{C}$.

Digitaalimittarin osoitus (t_i): Koska digitaalimittarin resoluutio on melko suuri, pysyy osoitus staabiilina koko mittauksen aikana. Tämä epävarmuustekijä on merkityksetön.

Korrelaatio: Yllä olevien osatekijöiden välisiä korrelaatiota ei juuri ole.

Epävarmuuslaskenta

Suure X_i	Arvio x_i	Standardi epävarmuus $u(x_i)$	Jakauma	Herkkyyserroin C_i	Epävarmuus $u(y)=C_i \cdot u(x_i)$
V_x	9586,2 μV	0,29 μV	tasa	$1/(11,5 \mu\text{V}/^\circ\text{C})$	0,025 $^\circ\text{C}$
δV_{x2}	0 μV	0,50 μV	normaali	$1/(11,5 \mu\text{V}/^\circ\text{C})$	0,044 $^\circ\text{C}$
δV_{x3}	0 μV	1,73 μV	tasa	$1/(11,5 \mu\text{V}/^\circ\text{C})$	0,150 $^\circ\text{C}$
δV_p	0 μV	1,15 μV	tasa	$1/(11,5 \mu\text{V}/^\circ\text{C})$	0,100 $^\circ\text{C}$
$\delta E_{c1}(0^\circ\text{C}, t'')$	-0,9 μV	0,75 μV	normaali	$1/(11,5 \mu\text{V}/^\circ\text{C})$	0,065 $^\circ\text{C}$
$\delta E_{c2}(0^\circ\text{C}, t'')$	0 μV	0,34 μV	tasa	$1/(11,5 \mu\text{V}/^\circ\text{C})$	0,030 $^\circ\text{C}$
δt_{T3}	0 $^\circ\text{C}$	0,03 $^\circ\text{C}$	normaali	0,467	0,014 $^\circ\text{C}$
δt_1	0 $^\circ\text{C}$	0,029 $^\circ\text{C}$	tasa	1	0,029 $^\circ\text{C}$
t_1	999,8 $^\circ\text{C}$	merkityksetön	normaali	1	merkityksetön
digitaalimittarin korjaus	0,2 $^\circ\text{C}$				0,203 $^\circ\text{C}$

Esimerkki 11.2 Kalibroidun termoelementin liittäminen kalibroituun digitaalilämpömittariin

Digitaalimittarin sähköinen kalibrointi:

Kalibrointilämpötila	Vastaava mV-asetus	Digitaalimittarin osoitus	Kalibroinnin epävarmuus ($k=2$)
1000 $^\circ\text{C}$	9586,2 μV	999,8 $^\circ\text{C}$	0,4 $^\circ\text{C}$

Termoelementin kalibrointi:

Kalibrointilämpötila	Termoelementin tuottama jännite	Kalibroinnin epävarmuus ($k=2$)
1000 $^\circ\text{C}$	9581,3 μV	0,7 $^\circ\text{C}$

Termoelementti liitetään digitaalilämpömittariin. Termoelementti laitetaan uuniin, ja kun sen lämpötila on tasaantunut uunin lämpötilaan on digitaalimittarin osoitus 997,3 $^\circ\text{C}$. Mikä on termoelementin lämpötila?

Digitaalimittarin osoitus on t_{digit}

$$t_{\text{digit}} + K = t(V_{\text{sisään}})$$

eli kun digitaalilämpömittari näyttää 997,3 $^\circ\text{C}$ siihen on syötetty jännite joka vastaa lämpötilaa 997,5 $^\circ\text{C}$ eli 9558,3 μV . Termoelementti oli kalibroitu lämpötilassa 1000 $^\circ\text{C}$, jolloin sen tuottama standardinmukainen jännite olisi ollut 9587,1 μV . Sen tuottama jännite oli kuitenkin 5,8 μV alhaisempi kuin standardin arvo. Jos uunissa olevan termoelementin tuottama jännite siis oli 9558,3 μV ,

tulisi siihen ensin lisätä $5,8 \mu\text{V}$, jotta voimme käyttää IEC-standardin taulukoita: jännite $9564,1 \mu\text{V}$ vastaa lämpötilaa $998,0 \text{ }^\circ\text{C}$.

Mittauksen epävarmuuden laskenta: $2 \cdot (0,20^2 + 0,35^2 + \dots)^{1/2} \text{ }^\circ\text{C}$, muut tekijät tulevat uunin stabiiliudesta ja gradienteista jne.

Huom! Suosittelemme ehdottomasti termoelementin kalibrointia digitaalimittariin kytkettynä.

Lisätietoja: EA-10/11 Guidelines on the Calibration of Temperature Indicators and Simulators by Electrical Simulation and Measurement

IEC 584-1, Second edition 1995-09 Thermocouples, Part 1: reference tables

12. LÄMPÖMITTARIN VALINTA JA OMAN KALIBROINTITOIMINNAN SUUNNITTELU

12.1 Lämpömittarin valinta

Lämpömittareiden joukosta löytyy monia ominaisuuksia:

Taulukko 12.1 Erilaisten lämpömittareiden ominaisuuksia

Tyyppi	Ominaisuudet
lasilämpömittari	<ul style="list-style-type: none"> -tarkassa mittauksessa tarvitaan laite, jolla voidaan nähdä jakovälin murto-osia -toiminta-alue -55 °C tai $-38\text{ °C} \dots 600\text{ °C}$ -jakoväli $0,01\text{ °C} \dots 2\text{ °C}$ -kokonaan tai osittain upotettuja mittareita -menee helposti rikki -elohopeapatsas saattaa mennä poikki -yleensä stabiili laite -EU tulee kieltämään elohopeamittareiden myynnin
vastusanturi	<ul style="list-style-type: none"> -tarvitaan vastusmittari tai digitaalimittari ja jäähaude tai veden kolmoispistekenno -resoluutio on yleensä riittävä, jos on hyvä vastusmittari tai silta -digitaalimittarin resoluutio saattaa olla suurin epävarmuuskomponentti -käyttöalue $-200\text{ °C} \dots 960\text{ °C}$ -löytyy seuraavia mittarityyppejä: $100\ \Omega$, $200\ \Omega$, $500\ \Omega$, yleensä teollisuusantureita, mutta löytyy hyviä Pt100-antureita muuhunkin käyttöön, $-189\text{ °C} \dots 660\text{ °C}$ -on lyhyitä ja pitkiä, ohuita tai paksuja antureita, paksu anturi on yleensä hidas, lyhyitä antureita ei voida käyttää korkeissa lämpötiloissa -vastusantureissa tapahtuu lämmönjohtumista -vastusanturi on upotettava riittävän syvälle mitattavaan aineeseen -vastusanturi ei kestä kolhiintumista
termoelementti	<ul style="list-style-type: none"> -käyttöalue laaja $t_{\max} \approx 1600\text{ °C}$ tai korkeampi -tarvitaan digitaalivolttimittari tai digitaalilämpömittari -digitaalilämpömittarin resoluutio $0,1\text{ °C}$ tai 1 °C vaikuttaa mittauserävarmuuteen -lyhyt anturi alemmissa lämpötiloissa, pitkä anturi korkeissa lämpötiloissa
digitaalinen lämpömittari	<ul style="list-style-type: none"> -koostuu anturista ja näyttölaitteesta, joka muuntaa siihen kytketyn termoelementin jännitteen tai vastusmittarin vastusarvon lämpötilaksi
Infrapunalämpömittari (pyrometri)	<ul style="list-style-type: none"> -koskettamaton mittaus, lämpötila-alue $-50\text{ °C} \dots 3000\text{ °C}$ -mitattavan kohteen emissiivisyys on tunnettava -käsimittareita, teollisuusmittareita ja referenssimittareita, resoluutio $0,001\text{ °C} \dots 1\text{ °C}$ -mittarin kohdistaminen on tärkeää
termistori	<ul style="list-style-type: none"> -mittausvirta vaikuttaa näyttämään, suppea alue, omat kertoimet laskettavissa tarkasti
pintalämpömittari	<ul style="list-style-type: none"> -Pt100-anturi tai termoelementti liitettynä digitaalilämpömittariin, anturin kosketus pintaan aiheuttaa monenlaisia ongelmia, mittauserävarmuus esim. lämpötilassa 300 °C saattaa olla 30 °C
lämpötilalähetin	<ul style="list-style-type: none"> -anturista ja mittauslaitteesta koostuva laite, jonka ulostulo on joko virta, jännite tai lämpötila.

12.2 Kalibrointitilan suunnittelu

Oma kalibrointitila kannattaa perustaa, jos omassa talossa on suuri määrä lämpömittareita, joita pitää kalibroida. Jos näitä on vain muutama, on halvempi lähettää ne kaikki kalibroitavaksi esim. akkreditoituun kalibrointilaboratorioon. Tarvitaan myös henkilö ylläpitämään kalibrointitilan laitteet. Henkilöstöä pitää kouluttaa kalibrointitoimintaan.

Mitä laitteita yms. tarvitaan omaan kalibrointipisteeseen?

- kalibroitu referenssimittari ja tarvittavat lisälaitteet (vastusmittari, silta tai DVM)
- haude, uuni, tai mustan kappaleen säteilijä jonka kanssa referenssianturia käytetään
- kalibrointipäiväkirja tai mikrotietokone, mihin kalibrointitulokset tallennetaan
- referenssimittareiden kalibrointitodistukset
- mahdollisesti standardi CEI/IEC 751(vastusanturit) tai CEI/IEC 584-1 (termoelementit)

Lisäksi tarvitaan kalibroinnin suoritusohjeita. laiterekisteriä, referenssiantureiden kalibrointiohjelmaa jne.

Hauteita löytyy eri lämpötila-alueille, esimerkiksi alkoholihaude -80 °C tai $-30\text{ °C} \dots 10\text{ °C}$, vesihaude $+10\text{ °C} \dots 95\text{ °C}$ (huom: lasilämpömittareita ei kannata kalibroida vesihauhteessa, jossa lämpötila on korkeampi kuin 80 °C , koska asteikon luettavuus huononee kun vesihöyryn muodostuminen lisääntyy), öljyhaude $80\text{ °C} \dots 300\text{ °C}$, suolahaude $250\text{ °C} \dots 600\text{ °C}$. Kannattaa valita haude, jossa upotussyvyys on riittävän iso.

Markkinoilta löytyy pitkiä ja lyhyitä uuneja (kalibraattoriuunit), pystyuuneja ja vaakauuneja. Vaakauuni on usein kätevämpi, koska antureiden muoviset kahvat sulavat helposti kuumen pystyuunin yläpuolella. Lyhyitä antureita ei kuitenkaan pysty vaakauunissa kalibroimaan, koska vaakauunin päissä ei ole tasainen lämpötila.

Lasilämpömittareiden kalibrointi tapahtuu nestehauteessa tai sääkaapissa, ei koskaan uunissa.

13. KALIBROINTESIMERKKEJÄ

Esimerkki 13.1 Lasilämpömittarin kalibrointi

Lasilämpömittari voidaan kalibroida laitteistolla, joka koostuu nestehauteesta sekä kalibroidusta referenssimittarista. Mittauksiin kuluva aika on usein pitkä, koska ennen varsinaisia mittauksia täytyy odottaa lämpötilan ja lämpötilaerojen tasaantumiseen kuluva aika.

Ennen mittausten aloittamista valitaan kalibrointipisteet ja *upotussyvyys*. Myös kalibroitava lämpömittari on syytä tarkastaa ennen mittauksia. Mittarin on oltava hyvässä kunnossa: sen asteikon tulisi olla hyvin näkyvässä ja lämpömittarissa kiinni, ja nestepatsaan täytyy ehdottomasti olla yhtenäinen. Tarvittaessa nestepatsas voidaan saada yhtenäiseksi naputtamalla, ravistamalla, lämmittämällä tai jäädyttämällä.

Kalibroitava mittari asetetaan niin, että sen kärki on referenssimittarin kärjen vieressä kuitenkin pitäen mielessä sen upotussyvyys. Mikäli mittarit joudutaan asettamaan siten, että niiden kärjet ovat eri syvyydellä, on tuloksissa otettava huomioon käytettävässä hauteessa olevat lämpötilaerot mitaushetkellä.

Kalibroinnin aikana hauteen lämpötila saa olla tasainen tai hitaasti nouseva, mutta ei laskeva. Jos kalibroitavan anturin *vasteaika* eroaa paljon referenssianturin vasteajasta, kannattaa pitää hauteen *lämpötila tasaisena*. Vasteaika kuvaa mittarin kykyä reagoida lämpötilan muutoksiin. Oletetaan esimerkiksi, että lämpötila nousee jatkuvasti mittauksen aikana ja kalibroitava mittari reagoi referenssimittaria hitaammin lämpötilan muutoksiin (eli sen vasteaika on pidempi). Tällöin kalibroitava mittari näyttää lämpötilaa, joka on referenssimittarin näyttämään verrattuna alhaisempi kuin silloin, kun lämpötila on tasainen. Jos kalibroitavana on paksu lasilämpömittari ja referenssinormaalina ohut vastusanturi on selvää, että lasilämpömittarin lämpötila muuttuu paljon hitaammin kuin vastusanturi.

Mittaukset

Luetaan referenssimittari (REF) ja kalibroitava mittari (KAL) vuorotellen esim. 8 kertaa (lukemat kirjoitetaan esim. kalibrointipäiväkirjaan tai suoraan taulukkolaskentaohjelman taulukkoon).

Jos esimerkiksi referenssimittareita on kaksi ja kalibroitavia kolme, voidaan lukea mittarit seuraavalla tavalla: REF1-KAL1-KAL2-KAL3-REF2-REF2-KAL3-KAL2-KAL1-REF1 (toistetaan muutamia kertoja). Tällä tavoin kummankin referenssimittarin lukemien keskiarvo edustaa mahdollisimman hyvin hitaasti nousevan lämpötilan keskiarvoa kalibroinnin aikana.

Lasilämpömittareiden kalibroinnin tulosten laskenta

Oletetaan että kalibroitavana on kolme lasilämpömittaria:

KAL1, jonka askelarvo on 0,1 °C

KAL2, jonka askelarvo on 1 °C

KAL3, jonka askelarvo on 1 °C.

Kalibroinnissa käytetään referenssimittareina kahta digitaalista lämpömittaria REF1 ja REF2, joiden resoluutio on 0,01 °C. REF1:n kalibrointitodistuksissa mainittu korjaus on +0,01 °C. Vastaava kor-

jaus REF2:lle on $+0,03$ °C. Kummassakin todistuksessa ilmoitettu kalibroinnin laajennettu epävarmuus ($k = 2$) oli $0,04$ °C.

Kalibroitavat upotettiin niissä mainitun upotussyvyyden mukaisesti. Referenssianturit upotettiin niiden kalibroitodistuksissa mainitulle syvyydelle. Kalibroitavia arvioitiin voitavan lukea puolen askelarvon tarkkuudella.

Mittaustulokset sekä niistä lasketut keskiarvot ja keskiarvojen keskihajonnat ovat seuraavassa taulukossa:

Taulukko 13.1.1 Mittaustulokset

	REF1 [°C]	KAL1 [°C]	KAL2 [°C]	KAL3 [°C]	REF2 [°C]
1. mittaus	30,25	30,30	29,5	28,5	30,23
2. mittaus	30,27	30,30	30,0	29,0	30,23
3. mittaus	30,28	30,35	30,0	29,0	30,26
4. mittaus	30,30	30,35	30,0	29,5	30,26
5. mittaus	30,30	30,35	30,5	29,5	30,28
6. mittaus	30,32	30,40	30,5	29,5	30,28
7. mittaus	30,33	30,40	30,5	30,0	30,31
8. mittaus	30,35	30,45	31,0	30,0	30,31
Keskiarvo:	30,299	30,363	30,25	29,38	30,269
Keskiarvon keskihajonta:	0,010	0,02	0,14	0,16	0,009

Hauteen nesteen lämpötila (ns. referenssilämpötila) voidaan nyt laskea REF1:n ja REF2:n tulosten perusteella, kun otetaan huomioon:

- referenssimittarien kalibrintikorjaukset (δt_{REF1} ja δt_{REF2})
- referenssimittarien lukemien ero (δt_{ero}) eli vaakasuuntaiset lämpötilaerot hauteessa
- pystysuuntaiset lämpötilaerot hauteessa (δt_{haude})
- referenssimittarien pitkäaikaisstabiilius (eli mittarien ominaisuuksien mahdollinen muutos viimeisen kalibroinnin jälkeen, δt_{stab1} ja δt_{stab2})
- referenssimittarien resoluutio (δt_{resol}).

Referenssilämpötila on siis:

$$t_{ref} = \frac{1}{2} (t_{REF1} + \delta t_{REF1} + \delta t_{stab1} + t_{REF2} + \delta t_{REF2} + \delta t_{stab2}) + \delta t_{ero} + \delta t_{haude} + \delta t_{resol}$$

Koska tässä esiintyvien korjausten - kalibrintikorjauksia lukuun ottamatta - arvioidaan olevan keskimäärin nolla, referenssilämpötilaksi saadaan:

$$t_{ref} \approx \frac{1}{2} [(30,299 \text{ °C} + 0,01 \text{ °C}) + (30,269 \text{ °C} + 0,03 \text{ °C})] = 30,30 \text{ °C}$$

Kunkin mittarin kalibrintikorjaus (δt_{KAL}) saadaan vähentämällä referenssilämpötilasta mittarin näyttämä lämpötila (t_{KAL}) ottaen huomioon mittarin lukemisepävarmuudesta (asteikon askelarvo) aiheutuva korjaus (δ_{le}). Sen oletetaan olevan keskimäärin nolla, joten:

$$\text{Mittari KAL1: } \delta_{\text{KAL1}} = t_{\text{ref}} - t_{\text{KAL1}} - \delta_{\text{le1}} \approx 30,30 \text{ }^\circ\text{C} - 30,36 \text{ }^\circ\text{C} = -0,06 \text{ }^\circ\text{C} \approx -0,1 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{Mittari KAL2: } \delta_{\text{KAL2}} = t_{\text{ref}} - t_{\text{KAL2}} - \delta_{\text{le2}} \approx 30,30 \text{ }^\circ\text{C} - 30,3 \text{ }^\circ\text{C} = 0 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{Mittari KAL3: } \delta_{\text{KAL3}} = t_{\text{ref}} - t_{\text{KAL3}} - \delta_{\text{le2}} \approx 30,30 \text{ }^\circ\text{C} - 29,4 \text{ }^\circ\text{C} = 0,9 \text{ }^\circ\text{C} \approx 1 \text{ }^\circ\text{C}$$

Kalibrintituloksen eli kalibrintikorjauksen epävarmuus koostuu edellä esitetyn mukaisesti referenssilämpötilan ja mittarin näyttämän epävarmuudesta. Mittarilukemien (t_{REF1} , t_{REF2} , t_{KAL}) epävarmuus määritetään lukemien hajonnan avulla. Referenssimittarien kalibrintikorjausten epävarmuus saadaan niiden kalibrintitodistuksista eli: $0,04 \text{ }^\circ\text{C} / 2 = 0,02 \text{ }^\circ\text{C}$.

Aiemmin referenssimittareille tehtyjen kalibrintien perusteella oletetaan, että niiden kalibrintikorjaus ei muutu kalibrintien välillä enempää kuin $0,01 \text{ }^\circ\text{C}$, joten δt_{stab1} ja δt_{stab2} :n epävarmuudeksi arvioidaan:

$$u(\delta t_{\text{stab1}}) = u(\delta t_{\text{stab2}}) = \frac{0,01 \text{ }^\circ\text{C}}{\sqrt{3}} = 0,006 \text{ }^\circ\text{C}$$

Vaakasuuntaisten lämpötilaerojen aiheuttama epävarmuus $u(\delta t_{\text{ero}})$ arvioidaan referenssimittarien lukemien erosta:

$$u(\delta t_{\text{ero}}) = \frac{1}{2\sqrt{3}} [(30,299 \text{ }^\circ\text{C} + 0,01 \text{ }^\circ\text{C}) - (30,269 \text{ }^\circ\text{C} + 0,03 \text{ }^\circ\text{C})] = 0,003 \text{ }^\circ\text{C}$$

Hauteessa olevat pystysuuntaiset lämpötilaerot on mitattu platinavastusanturilla upottamalla se eri syvyyksiin. Niiden on havaittu olevan enintään $0,005 \text{ }^\circ\text{C}$, joten

$$u(\delta t_{\text{haude}}) = \frac{0,005 \text{ }^\circ\text{C}}{2\sqrt{3}} = 0,002 \text{ }^\circ\text{C}$$

Referenssimittarien resoluutio on $0,01 \text{ }^\circ\text{C}$, joten

$$u(\delta t_{\text{resol}}) = \frac{0,01 \text{ }^\circ\text{C}}{2\sqrt{3}} = 0,003 \text{ }^\circ\text{C}$$

Kalibroitavien mittarien lukemisepävarmuudeksi arvioitiin:

$$u(\delta_{\text{le1}}) = \frac{0,05 \text{ }^\circ\text{C}}{2\sqrt{3}} = 0,015 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$u(\delta_{\text{le2}}) = u(\delta_{\text{le3}}) = \frac{0,5 \text{ }^\circ\text{C}}{2\sqrt{3}} = 0,15 \text{ }^\circ\text{C}$$

Kalibroinnin tuloksen laskenta epävarmuusarvio mukaan lukien voidaan esittää alla olevien taulukoiden mukaisina laskelmina. Niissä kukin suure eli mittaustulokseen vaikuttava tekijä on esitetty omalla rivillään. Kyseisen suureen nimi, keskimääräinen arvo, standardiepävarmuus, todennäköisyysjakauman tyyppi, herkkyyskerroin ja vaikutus yhdistettyyn standardiepävarmuuteen ovat omisissa sarakkeissaan. Jos standardiepävarmuus on määritetty keskiarvon keskihajonnan mukaan, jakauksen tyyppi on normaali. Myös kalibrintitodistuksesta otettu kalibroinnin epävarmuus oletetaan noudattavan normaalijakaumaa. Tyypin B tavalla määritetty standardiepävarmuus oletetaan yleensä noudattavan tasajakaumaa.

Taulukko 13.1.2 Kalibroinnin tuloksen laskenta mittarille KAL1

Suure X_i	Arvio x_i	Standardi- epävarmuus $u(x_i)$	Jakauma	Herkkyys- kerroin C_i	Epävarmuus $u(y)=C_i \cdot u(x_i)$
t_{REF1}	30,299 °C	0,01 °C	normaali	0,5*	0,005 °C
δt_{REF1}	0,01 °C	0,02 °C	normaali	0,5	0,01 °C
δt_{stab1}	0 °C	0,006 °C	tasa	0,5	0,003 °C
t_{REF2}	30,269 °C	0,009 °C	normaali	0,5	0,005 °C
δt_{REF2}	0,03 °C	0,02 °C	normaali	0,5	0,01 °C
δt_{stab2}	0 °C	0,006 °C	tasa	0,5	0,003 °C
δt_{ero}	0 °C	0,003 °C	tasa	1	0,003 °C
δt_{haude}	0 °C	0,002 °C	tasa	1	0,002 °C
δt_{resol}	0 °C	0,003 °C	tasa	1	0,003 °C
t_{KAL1}	30,636 °C	0,02 °C	normaali	-1	-0,02 °C
δ_{le1}	0 °C	0,015 °C	tasa	-1	-0,015 °C
Korjaus: δt_{KAL1}	-0,059 °C				0,030 °C

Taulukko 13.1.3 Kalibroinnin tuloksen laskenta mittarille KAL2

Suure X_i	Arvio x_i	Standardi- epävarmuus $u(x_i)$	Jakauma	Herkkyys- kerroin C_i	Epävarmuus $u(y)=C_i \cdot u(x_i)$
t_{REF1}	30,299 °C	0,01 °C	normaali	0,5	0,005 °C
δt_{REF1}	0,01 °C	0,02 °C	normaali	0,5	0,01 °C
δ_{stab1}	0,000 °C	0,006 °C	tasa	0,5	0,003 °C
t_{REF2}	30,269 °C	0,009 °C	normaali	0,5	0,005 °C
δt_{REF2}	0,03 °C	0,02 °C	normaali	0,5	0,01 °C
δt_{stab2}	0 °C	0,006 °C	tasa	0,5	0,003 °C
δt_{ero}	0 °C	0,003 °C	tasa	1	0,003 °C
δt_{haude}	0 °C	0,002 °C	tasa	1	0,002 °C
Δt_{resol}	0 °C	0,003 °C	tasa	1	0,003 °C
t_{KAL2}	30,25 °C	0,14 °C	normaali	-1	-0,14 °C
δ_{le2}	0 °C	0,15 °C	tasa	-1	-0,15 °C
Korjaus: δt_{KAL2}	0,05 °C				0,21 °C

Taulukko 13.1.4 Kalibroinnin tuloksen laskenta mittarille KAL3

Suure X_i	Arvio x_i	Standardi- epävarmuus $u(x_i)$	Jakauma	Herkkyys- kerroin C_i	Epävarmuus $u(y)=C_i \cdot u(x_i)$
t_{REF1}	30,299 °C	0,01 °C	normaali	0,5	0,005 °C
δt_{REF1}	0,01 °C	0,02 °C	normaali	0,5	0,01 °C
δt_{stab1}	0 °C	0,006 °C	tasa	0,5	0,003 °C
t_{REF2}	30,269 °C	0,009 °C	normaali	0,5	0,005 °C
δt_{REF2}	0,03 °C	0,02 °C	normaali	0,5	0,01 °C
δt_{stab2}	0 °C	0,006 °C	tasa	0,5	0,003 °C
δt_{ero}	0 °C	0,003 °C	tasa	1	0,003 °C
δt_{haude}	0 °C	0,002 °C	tasa	1	0,002 °C
δt_{resol}	0 °C	0,003 °C	tasa	1	0,003 °C
t_{KAL3}	23,98 °C	0,16 °C	normaali	-1	-0,16 °C
δ_{le3}	0 °C	0,15 °C	tasa	-1	-0,15 °C
Korjaus: δt_{KAL3}	0,92 °C				0,22 °C

Taulukon alariville on laskettu kalibrintikorjaukselle määritetty arvo ja sen standardiepävarmuus. Korjauksen arvo saadaan laskettua kunkin suureen arvosta käyttäen edellä esitettyä laskentakaavaa (eli laskemalla t_{ref} käyttäen taulukon 13.1.1 jälkeen esitettyä laskentakaavaa ja vähentämällä siitä t_{KAL} ja δ_{le}). Yhdistetty standardiepävarmuus saadaan laskemalla yhteen kunkin suureen epävarmuus kerrottuna itsellään (eli korotettuna toiseen potenssiin) ja ottamalla näin saadusta summasta neliöjuuri.

Kalibroinnin tulosta ilmoitettaessa merkitään usein näkyviin mittanormaanin ja kalibroitavan laitteen lukemat, jotta ei syntyisi sekaannusta tuloksia käytettäessä. Mittareiden KAL1, KAL2 ja KAL3 kalibroinnin tulos on siis:

Mittari	Mittanormaali Lämpötila / °C	Kalibroitava Lämpötila / °C	Epävarmuus ($k=2$) Lämpötila / °C
KAL 1	30,30	30,36	0,06
KAL 2	30,30	30,3	0,5
KAL 3	30,30	29,4	0,5

Kalibroinnin epävarmuus ilmoitetaan laajennettuna epävarmuutena eli kertomalla yhdistetty standardiepävarmuus tekijällä kaksi. Esimerkiksi mittarin KAL3 kalibroinnin epävarmuus on $2 \cdot 0,22 \text{ °C} = 0,44 \text{ °C}$. Epävarmuuslukemat pyöristetään ylöspäin 5 % säännön mukaisesti, joten kalibroinnin epävarmuudeksi ilmoitetaan 0,5 °C.

Esimerkki 13.2 Digitaalilämpömittarin kalibrointituloksen laskeminen

Tarkastellaan digitaalilämpömittaria, jossa anturina on J-tyypin termoelementti. Näytön resoluutio on 0,1 °C. Näyttämän pyöristymisestä lähimpään täyteen askeleeseen ei ole tietoa. Pyöristysepävarmuudeksi oletetaan siten koko resoluutio. Kun tästä johtuva epävarmuus oletetaan tasan jakautuneeksi, on standardiepävarmuus tässä tapauksessa resoluutio jaettuna $\sqrt{3}$:lla eli $0,1/\sqrt{3}$ °C. Näytölaitteessa on sisäänrakennettu vertailulämpötilan kompensointi.

Eräs kalibrointipiste on 200 °C. Kalibrointi suoritetaan öljyhautessa. Lämpötilanormaalina käytetään Pt100-anturilla toimivaa digitaalista lämpömittaria, jonka kalibrointiepävarmuus on 0,015 °C ($k=2$) ja resoluutio 0,001 °C. Antureiden upotussyvyys on 200 mm. Lämpötilanormaalin kalibrointikorjaus on $-0,08$ °C.

Taulukko 13.2.1 Mittaustulokset

Mittanormaalin lukema	Normaali t_S [°C]	Digitaalilämpömittari [°C]
1. mittaus	200,346	200,4
2. mittaus	200,348	200,5
3. mittaus	200,347	200,4
4. mittaus	200,345	200,5
Keskiarvo	200,3465	200,45
Keskiarvon keskihajonta	0,0006	0,03

Digitaalilämpömittarin kalibrointikorjaus ja -epävarmuus lasketaan kaavoista: $t_{90} = t_S + \delta t_{SKAL} + \delta t_{RES} + \delta t_{HAUDE}$

$$\delta t_{DIGKORJ} = t_S + \delta t_{SKAL} + \delta t_{SRES} + \delta t_{HAUDE} - (t_{DIG} + \delta t_{DIGRES} + \delta t_{DIGKOMP} \cdot C_{DIGKOMP})$$

missä

t_S	Mittanormaaln näyttämä
δt_{SKAL}	Mittanormaaln korjaus kalibrointitodistuksen mukaan
δt_{SRES}	Mittanormaaln resoluutiosta johtuva korjaus
δt_{HAUDE}	Öljyhautteen lämpötilaeroista johtuva korjaus
t_{DIG}	Kalibroitavan lämpömittarin näyttämä
δt_{DIGRES}	Kalibroitavan lämpömittarin näytön resoluutiosta aiheutuva korjaus
$\delta t_{DIGKOMP}$	Kalibroitavan lämpömittarin vertailupisteen kompensoinnista johtuva korjaus
$C_{DIGKOMP}$	Kompensoinnista johtuvan korjauksen herkkyyserroin

Korjausten epävarmuustekijät

t_S	Mittanormaalien mittaustuloksista lasketun keskiarvon keskihajonta $0,0006\text{ °C}$ ($k=1$), normaalijakauma.
t_{DIG}	Kalibroittavan digitaalilämpömittarin mittaustuloksien keskiarvon keskihajonta $0,03\text{ °C}$ ($k=1$), normaalijakauma.
δt_{SKAL}	Mittanormaalien kalibrintikorjaus on $-0,08\text{ °C}$ ja kalibrintiepävarmuus on $0,015\text{ °C}$ ($k=2$), normaalijakauma.
δt_{HAUDE}	Lämpötilagradienttien vaikutus öljyhauteessa $0,008\text{ °C}$, tasajakauma, standardiepävarmuus $0,008/\sqrt{3}\text{ °C} = 0,005\text{ °C}$.
δt_{SRES}	Mittanormaalien näytön resoluutio on $0,001\text{ °C}$. Ei oleteta, että näyttämä pyöristyy lähimpään täyteen askeleeseen. Pyöristysepävarmuus on siten enintään resoluution verran, tasajakauma, standardiepävarmuus $0,001/\sqrt{3}\text{ °C} = 0,0006\text{ °C}$.
δt_{DIGRES}	Kalibroittavan mittarin näytön resoluutio on $0,1\text{ °C}$, tasajakauma, standardiepävarmuus $0,1/\sqrt{3}\text{ °C} = 0,058\text{ °C}$.
$\delta t_{DIGKOMP}$	Kalibroittavan mittarin vertailupisteen kompensoinnin epävarmuus on arvioitu olevan $0,1\text{ °C}$, liitoksen lämpötila on noin 21 °C , tasajakauma, standardiepävarmuus $0,1/\sqrt{3}\text{ °C} = 0,058\text{ °C}$. J-tyyppin Seebeck arvo lämpötilassa 21 °C on $51,55\text{ }\mu\text{V/°C}$ ja lämpötilassa 200 °C $55,50\text{ }\mu\text{V/°C}$. Näistä saadaan herkkyyskerroimeksi $51,55/55,5 = 0,93$.

Epävarmuuslaskelma esitetään taulukkomuodossa.

Taulukko 13.2.2 Epävarmuuskomponentit

Suure X_i	Arvio x_i	Standardiepävarmuus $u(x_i)$	Jakauma	Herkkyyskerroin C_i	Epävarmuus $u_i(y)=C_i \cdot u(x_i)$
t_S	$200,3465\text{ °C}$	$0,001\text{ °C}$	normaali	1	$0,001\text{ °C}$
t_{DIG}	$200,45\text{ °C}$	$0,030\text{ °C}$	normaali	1	$0,030\text{ °C}$
δt_{SKAL}	$-0,08\text{ °C}$	$0,008\text{ °C}$	normaali	1	$0,008\text{ °C}$
δt_{HAUDE}	0	$0,005\text{ °C}$	tasa	1	$0,005\text{ °C}$
δt_{SRES}	0	$0,001\text{ °C}$	tasa	1	$0,001\text{ °C}$
δt_{DIGRES}	0	$0,058\text{ °C}$	tasa	1	$0,058\text{ °C}$
$\delta t_{DIGCOMP}$	0	$0,058\text{ °C}$	tasa	0,93	$0,054\text{ °C}$
δt_{DIG}	$-0,18\text{ °C}$		Yhdistetty epävarmuus $u(y)$		$0,085\text{ °C}$

Laajennettu epävarmuus: $U = k \cdot u(y) = 2 \cdot 0,085\text{ °C} = 0,17\text{ °C}$

Tulos:

Lämpötila t_{90} [°C]	Näytön lukema t_{DIG} [°C]	Korjaus $t_{90} - t_{DIG}$ [°C]	Kalibroinnin epävarmuus [°C]	Anturin upotussyvyys [mm]
200,27	200,45	-0,18	0,17	200

Esimerkki 13.3 Lämpökaapin kalibrointi

Lämpökaappi kalibroidaan joko tyhjänä tai sopivalla kuormalla. Seurataan myös kaapin käyttäytymistä ajan funktiona ja kaapin tuottaman lämpötilan toistuvuutta.

Jos kaappi kalibroidaan tyhjänä, on arvioitava mahdollisen kuorman vaikutusta kaapin lämpötilaan.

Lämpökaappi kalibroitiin tyhjänä asettamalla siihen 15 anturia ja seuraamalla niiden osoituksia 30 minuutin aikana. Kaapin lämpötila säädettiin arvoon 40 °C. Referenssimittarin ja antureiden kalibrointiepävarmuus oli 0,25 °C ($k = 2$).

Mittaustulokset ovat taulukossa 13.3.1.

Taulukko 13.3.1 Mittaustulokset ajan funktiona.

aika	ant. 1	ant. 2	ant. 3	ant. 4	ant. 5	ant. 6	ant. 7	ant. 8	ant. 9	10	11	12	13	14	15
08:48	39.98	39.90	39.60	40.04	40.09	40.23	40.19	40.09	40.30	39.98	40.31	39.96	40.44	40.55	40.12
08:49	39.97	39.88	39.59	40.03	40.08	40.21	40.17	40.08	40.27	39.96	40.27	39.93	40.39	40.50	40.11
08:50	39.97	39.88	39.59	40.03	40.08	40.21	40.18	40.06	40.27	39.96	40.28	39.92	40.40	40.52	40.11
08:51	39.95	39.86	39.59	40.02	40.07	40.20	40.16	40.07	40.26	39.94	40.26	39.92	40.38	40.47	40.10
08:52	39.92	39.82	39.55	40.00	40.04	40.15	40.13	40.03	40.22	39.90	40.21	39.88	40.33	40.42	40.08
08:53	39.96	39.88	39.62	40.04	40.07	40.21	40.17	40.10	40.27	39.95	40.29	39.96	40.40	40.47	40.11
08:54	39.95	39.86	39.60	40.03	40.09	40.19	40.16	40.09	40.26	39.94	40.26	39.94	40.37	40.44	40.11
08:55	39.97	39.88	39.61	40.04	40.09	40.21	40.18	40.09	40.27	39.96	40.29	39.94	40.41	40.52	40.12
08:56	39.94	39.86	39.59	40.01	40.05	40.18	40.15	40.06	40.25	39.94	40.25	39.92	40.38	40.49	40.11
08:57	39.95	39.88	39.61	40.03	40.07	40.19	40.16	40.07	40.26	39.94	40.25	39.92	40.39	40.51	40.12
08:58	39.96	39.88	39.62	40.02	40.07	40.19	40.16	40.07	40.26	39.95	40.27	39.94	40.40	40.52	40.13
08:59	39.96	39.87	39.60	40.04	40.08	40.20	40.16	40.09	40.26	39.95	40.27	39.94	40.39	40.48	40.13
09:00	39.97	39.88	39.61	40.05	40.10	40.21	40.18	40.10	40.28	39.96	40.28	39.96	40.41	40.52	40.14
09:01	39.97	39.88	39.61	40.05	40.09	40.21	40.18	40.10	40.27	39.96	40.28	39.96	40.40	40.49	40.14
09:02	39.98	39.89	39.62	40.05	40.09	40.21	40.18	40.09	40.27	39.98	40.27	39.96	40.40	40.51	40.15
09:03	39.97	39.88	39.62	40.05	40.09	40.21	40.17	40.09	40.27	39.97	40.28	39.96	40.39	40.48	40.15
09:04	40.01	39.92	39.67	40.08	40.13	40.25	40.21	40.13	40.31	40.00	40.34	40.00	40.46	40.56	40.18
09:05	39.98	39.90	39.65	40.06	40.11	40.21	40.18	40.11	40.28	39.97	40.27	39.97	40.39	40.50	40.16
09:06	39.98	39.89	39.64	40.06	40.10	40.21	40.18	40.11	40.27	39.97	40.28	39.96	40.37	40.47	40.15
09:07	39.99	39.92	39.67	40.08	40.12	40.25	40.21	40.13	40.30	40.00	40.32	39.99	40.43	40.53	40.17
09:08	39.98	39.92	39.67	40.08	40.12	40.24	40.21	40.12	40.29	39.98	40.30	39.97	40.41	40.51	40.17
09:09	39.95	39.88	39.63	40.05	40.10	40.21	40.17	40.09	40.26	39.95	40.26	39.95	40.37	40.48	40.14
09:10	39.93	39.85	39.59	40.03	40.07	40.17	40.14	40.07	40.23	39.93	40.21	39.92	40.33	40.45	40.13
09:11	39.94	39.86	39.62	40.04	40.09	40.19	40.16	40.09	40.25	39.94	40.25	39.94	40.37	40.47	40.14
09:12	39.97	39.89	39.63	40.06	40.11	40.22	40.18	40.11	40.27	39.97	40.30	39.97	40.41	40.53	40.16
09:13	39.98	39.88	39.62	40.06	40.11	40.21	40.18	40.10	40.27	39.96	40.28	39.96	40.39	40.51	40.17
09:14	39.98	39.88	39.63	40.07	40.11	40.22	40.18	40.11	40.28	39.97	40.29	39.97	40.40	40.51	40.17
09:15	39.96	39.87	39.62	40.06	40.11	40.21	40.17	40.10	40.27	39.95	40.27	39.97	40.38	40.48	40.16
09:16	39.97	39.88	39.62	40.06	40.11	40.21	40.18	40.11	40.27	39.95	40.28	39.97	40.39	40.49	40.16
09:17	39.98	39.88	39.63	40.07	40.11	40.21	40.17	40.11	40.27	39.96	40.29	39.97	40.39	40.48	40.17
keskiarvo	39.97	39.88	39.62	40.05	40.09	40.21	40.17	40.09	40.27	39.96	40.28	39.95	40.39	40.50	40.14

Anturin 14 tulokset poikkeavat eniten asetetusta lämpötilasta 40 °C eli 0,50 °C, joten lasketaan esim. epävarmuudet tälle anturille. Anturin 14 tulosten keskihajonta on 0,03 °C. Keskiarvon keskihajonta on $0,03 \text{ °C}/\sqrt{(30)} = 0,0055 \text{ °C}$.

Mittanormaanin epävarmuus oli 0,25 °C ($k = 2$), joten anturin 14 mittaustuloksen laajennettu epävarmuus on $2 \times [(0,25 \text{ °C}/2)^2 + (0,0055 \text{ °C})^2]^{1/2} = 0,25 \text{ °C}$. Anturin nro 14 mittaustulos on siis **40,50 °C ± 0,25 °C**.

Kaapin lämpötila asetusarvolla 40 °C on välillä 39,62 °C ... 40,50 °C laajennetulla epävarmuudella 0,25 °C.

Kalibroinnin tuloksena ilmoitetaan myös mittaustulosten lisäksi jokaisen anturin sijainti ja kaapin lämpötilan stabiilius ajan funktiona. Tässä esimerkissä haluttiin vain katsoa lämpökaapin lämpötilan vaihteluja. Todellisten lämpötilojen laskennassa täytyy ottaa muutkin epävarmuustekijät mukaan.

Esimerkki 13.4 Pt100-anturin kalibrointituloksen laskeminen

Kalibrointi suoritetaan vertaamalla kalibroitavaa 4-johdin Pt100-anturia ITS-90-asteikon kiintopisteissä kalibroituun Pt25-platinavastusanturiin. Lämpötilanormaalien vastusmittaus suoritetaan automaattisella mittasillalla, joka mittaa Pt25-anturin ja 25 Ω :n referenssivastuksen vastussuhdetta. Kalibroitavan Pt100-anturin vastusmittaus suoritetaan 5 ½ numeron digitaalisella yleismittarilla ja 4-johdin kytkennällä sekä 1 mA DC mittaussvirralla.

Eräs kalibrointilämpötila on 150 °C, joka suoritetaan öljyhauteessa. Anturin stabiiliutta kalibroinnin aikana seurataan jäähauteessa, jonka lämpötila on (0,000 ± 0,005) °C.

Taulukko 13.4.1 Mittaustulokset

	Normaali Pt25 t_{90} [°C]	Mitattu Pt100 [Ω]	Laskettu Pt100 t_{IEC} [°C]
Normaalien lukemiin on tehty kalibrointitodistuksessa annettu korjaus	150,001	157,301	149,935
	149,997	157,295	149,919
	149,999	157,298	149,927
	150,000	157,299	149,930
Keskiarvo	149,9993	157,2983	149,928
Keskiarvon keskivirhe	0,0009	0,0012	0,003
Pt100-anturin virhe			-0,071

Mittaustuloksen laskennassa on käytetty seuraavia kaavoja:

$$t_{90} = t_S (W_S + \delta W_S) + \delta t_{KAL} + \delta t_{SD} + \delta t_{HAUDE}$$

Lämpötila t_S lasketaan vastussuhteesta

$$W_S + \delta W_S = \frac{(W_t + \delta W_t) \cdot (R_{ref} + \delta R_{ref})}{(R_{tp} + \delta R_{tp})}$$

lämpötila-asteikon ITS-90 laskentakaavoja käyttäen.

Oletuksella, että δW_t , δR_{ref} ja δR_{tp} merkityksettömän pieniä ja merkitsemällä (lämpötilanormaalien vastusarvo) $R_t = W_t \cdot R_{ref}$ voidaan kirjoittaa

$$t_{90} \cong t_S (R_t (W_t, R_{ref}), R_{tp}) + C_{wt} \cdot \delta W_t + C_{Rref} \cdot \delta R_{ref} + C_{Rtp} \cdot \delta R_{tp} + \delta t_{KAL} + \delta t_{SD} + \delta t_{HAUDE}$$

Herkkyyskertoimille voidaan johtaa seuraavat lausekkeet:

$$C_{wt} = \left(\frac{\partial t_s}{\partial W_s} \right) \frac{R_{ref}}{R_{tp}} \quad C_{R_{ref}} = \left(\frac{\partial t_s}{\partial W_s} \right) \frac{W_t}{R_{tp}} \quad C_{R_{tp}} = - \left(\frac{\partial t_s}{\partial W_s} \right) \frac{W_s}{R_{tp}}$$

Yksinkertaistetaan epävarmuuslaskentaa olettamalla, että $R_{ref} \approx R_{tp}$ jolloin δW_t sisältää mittasillan lisäksi referenssivastuksen ja veden kolmoispisteen vastusarvoon liittyvät korjaukset ja epävarmuudet. Kaava lämpötilan t_{90} laskemiseksi voidaan silloin kirjoittaa muotoon:

$$t_{90} \cong t_s(W_t) + C_{wt} \cdot \delta W_t + \delta t_{KAL} + \delta t_{SD} + \delta t_{HAUDE}$$

Kalibroittavan Pt100-anturin lämpötilan laskenta perustuu IEC 751 standardiin.

$$t_{IEC} = t_{IEC}(R_X + \delta R_X, R_0 + \delta R_0)$$

0 °...850 °C

$$R_X + \delta R_X = R_{0IEC} \cdot (1 + A \cdot t_{IEC} + B \cdot t_{IEC}^2)$$

missä

$$R_{0IEC} = R_0 + \delta R_0$$

Oletuksella, että δR_X ja δR_0 merkityksettömän pieniä voidaan kirjoittaa

$$t_{IEC} \cong t_{IEC}(R_X, R_0) + C_{RX} \cdot \delta R_X + C_{R0} \cdot \delta R_0$$

Herkkyyskerroimille voidaan johtaa seuraavat lausekkeet:

$$C_{RX} = \left(\frac{\partial t_{IEC}}{\partial R_X} \right) \quad C_{R0} = \left(\frac{\partial t_{IEC}}{\partial R_0} \right) \cdot (1 + A \cdot t_{IEC} + B \cdot t_{IEC}^2)$$

t_{90} Kalibrointihautteen lämpötila (ITS-90)

$t_s(W_s)$ Lämpötilanormaanin lämpötila

R_t Lämpötilanormaanin vastusarvo, $R_t = W_t \cdot R_{ref}$

W_t Mittasillan näyttämä

R_{ref} Referenssivastuksen vastusarvo

δR_{tp} Pt25-anturin korjaus veden kolmoispisteessä

δR_{ref} Referenssivastuksen lyhytaikaisesta stabiiliudesta johtuva korjaus

δW_t Mittasillan stabiiliudesta johtuva korjaus

δt_{KAL}	Pt25-anturin kalibroinnista johtuva korjaus
δt_{SD}	Pt25-anturin stabiiliudesta johtuva korjaus (kalibrointien välillä)
δt_{HAUDE}	Hauteen lämpötilagradienteista tuleva korjaus lämpötilaan
t_{IEC}	IEC 751 standardin laskentakaavaa käyttäen saatu lämpötila kalibroitavalle anturille vastusarvolla R_X
δt_{IEC}	Kalibroitavan anturin korjaus lämpötilaan t_{90} , $\delta t_{IEC} = t_{90} - t_{IEC}$
R_X	Pt100-anturin mitattu vastusarvo kalibrointilämpötilassa
δR_X	Pt100-anturin vastusarvon korjaus digitaalisen yleismittarin kalibrointitodistuksen mukaan
R_0	Pt100-anturin mitattu vastusarvo lämpötilassa 0 °C, 100 Ω
R_{0IEC}	Pt100-anturin nimellisarvo lämpötilassa 0°C, 100 Ω
δR_0	Pt100-anturin vastuksen nimellisarvon korjaus lämpötilassa 0 °C

Epävarmuuslaskelma esitetään taulukkomuodossa

Taulukko 13.4.2

Suure X_i	Arvio x_i	Standardiepävarmuus $u(x_i)$	Jakauma	Herkkyyskerroin C_i	Epävarmuus $u_i(y)=C_i \cdot u(x_i)$
$t_S(W_S)$	149,9993 °C	0,0009 °C	normaali	1	0,0009 °C
$t_{IEC}(R_X)$	149,9280 °C	0,0012 °C	normaali	1	0,0012 °C
δt_{KAL}	0	0,0015 °C	normaali	1	0,0015 °C
δt_{SD}	0	0,0012 °C	tasa	1	0,0012 °C
δt_{HAUDE}	0	0,0046 °C	tasa	1	0,0046 °C
δW_t	0	$3,17 \cdot 10^{-6}$	normaali	262 °C	0,0008 °C
δR_X	0	0,0025 Ω	normaali	2,7 °C/ Ω	0,0068 °C
δR_0	0	0,0012 Ω	tasa	4,2 °C/ Ω	0,0050 °C
δt_{IEC}	0,0713 °C		Yhdistetty epävarmuus $u(y)$		0,0100 °C

Laajennettu epävarmuus: $U = k \cdot u(y) = 2 \cdot 0,010 \text{ °C} = 0,020 \text{ °C}$

Tulos:

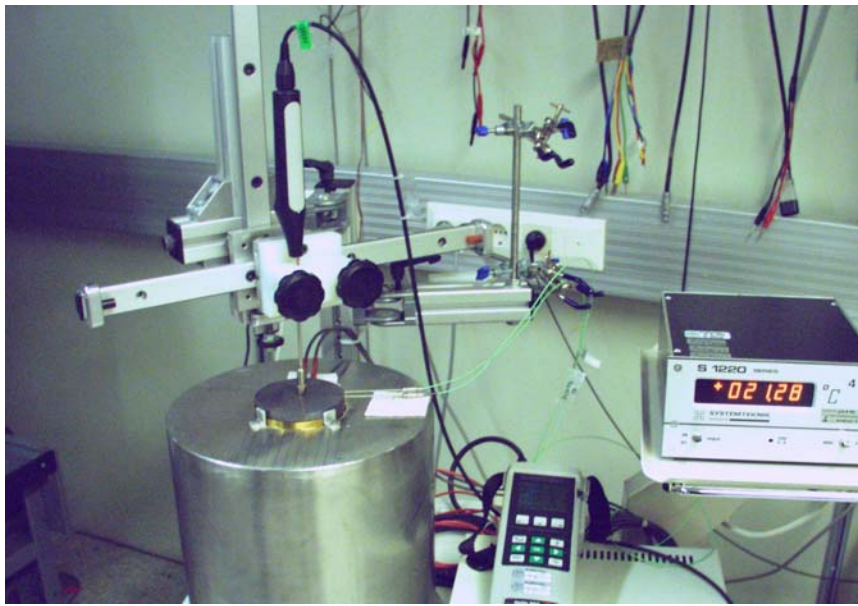
Lämpötila t_{90} [°C]	Mitattu Pt100 [Ω]	Vastaava lämpötila t_{IEC} [°C]	Korjaus $t_{90} -$ t_{IEC} [°C]	Kalibroinnin epävarmuus [°C]	Anturin upotus- syvyys [mm]
149,999	157,2983	149,928	+0,071	0,020	200

Epävarmuustekijät

- $t_S(W_S)$ Mittanormaalina käytetyn Pt25 anturin mittaustuloksista lasketun lämpötilan keskiarvo on 149,9993 °C ja keskiarvon keskihajonta 0,0009 °C ($k=1$), normaalijakauma.
- $t_{IEC}(R_X)$ Kalibroitavan Pt100 anturin mittaustuloksista lasketun lämpötilan keskiarvo on 149,928 °C ja keskiarvon keskihajonta 0,003 °C ($k=1$), normaalijakauma
- δt_{KAL} Pt25 anturin kalibrointiepävarmuus on kalibrointitodistuksen mukaan 0,003 °C ($k=2$), normaalijakauma, standardiepävarmuus 0,0015 °C.
- δt_{SD} Pt25 anturin stabiiliusseurannasta saatu epävarmuus 0,002 °C, tasajakauma, standardiepävarmuus $0,002/\sqrt{3}$ °C = 0,0012 °C
- δt_{HAUDE} Lämpötilagradientit öljyhauteessa ovat 0,008 °C, tasajakauma, standardiepävarmuus $0,008/\sqrt{3}$ °C = 0,0046 °C.
- δW_t Automaattisen mittasillan kalibrointiepävarmuus $4 \cdot 10^{-6}$ (4 ppm, $k=2$) lukemasta (sisältää referenssivastuksen ja veden kolmoispisteen kalibrointiepävarmuuden), normaalijakauma. Mittasillan näyttämä vastussuhde on 1,585002, josta voidaan laskea vastussuhteen epävarmuudeksi $2 \cdot 10^{-6} \cdot 1,585002 = 3,17 \cdot 10^{-6}$. Pt25 anturin laskentakaa-voista vastussuhteen herkkyysskerroimeksi lämpötilassa 150 °C saadaan $C_{W_t} = 262$ °C.
- δR_X Digitaalivolttimittarin kalibrointiepävarmuus 0,005 Ω (sisältää mittarin stabiiliuden kalibrointien välillä), $k=2$, normaalijakauma. Pt100 (150 °C) anturin 1 Ω :n muutos vastusarvossa muuttaa lämpötilalukemaa 2,7 °C, herkkyysskerroin $C_{R_X} = 2,7$ °C/ Ω .

Esimerkki 13.5 Pintalämpömittarin kalibrointi

Pintalämpömittarin kalibrointi tapahtuu joko upottamalla sen kärki kalibrintihauteeseen tai uuniin referenssianturin viereen (referenssianturin upotussyvyys riittävä), jolloin mittarin käyttäjän on mietittävä miten mittari käyttäytyy kuivalla pinnalla, tai asettamalla pintalämpömittari kalibroidulle lämpölevylle (heat-plate). Tällaisessa levyssä on lämmitysvastukset ja lämpötilan säätöyksikkö. Pinnan lämpötila saadaan laskettua upottamalla kaksi kalibroittua anturia eri korkeuksille pinnan alle. Pinnan lämpötila lasketaan näiden antureiden mitta-arvoista sekä lämmönjohtavuuskertoimesta ja emissiivisyydestä. Konvektio voidaan kalibroinnissa vähentää rakentamalla seinä lämpölevyn ympärille. Huom: pinnan alla olevia antureita ei lueta kun kalibroitava anturi on pinnalla, vaan ne luetaan ennen kalibroitavan anturin asettamisesta ja sitten kun kalibroitava anturi on otettu pois!



Kuva 13.5.1 Pintalämpömittarin kalibrointilaitteisto

Pintalämpömittarin mittausepävarmuus

Pintalämpömittarin mittausepävarmuuteen sisältyvät referenssimittareiden epävarmuudet, mutta myös muita tekijöitä: pinnan lämpötilagradienteista ja pintalämpömittarin kosketuksesta johtuva epävarmuus (mittari ei kohtisuorassa pintaa vastaan, pinta rosainen, mittari painetaan liian pienellä tai liian suurella voimalla pintaa vastaan, mittari johtaa lämpöä pinnasta pois tai tuo lisälämpöä).

Esimerkki: Pintalämpömittari (K-tyypin termoelementti) kalibroidiin lämpötilassa 300 °C vaakasuoran kuparisen lämpölevyn avulla. Referenssianturit (termoelementit) olivat lämpölevyn sisällä, toinen 5 mm pinnan alla, toinen 10 mm pinnan alla, samansuuntaiset pinnan kanssa.

Mittaustulokset

Mitattujen lukemien keskiarvot ilman korjauksia ovat

alempi anturi	ylempi anturi	kalibroitava mittari
288,877 °C	288,702 °C	290,72°C

Pinnan lämpötila on laskettavissa yksinkertaisen kaavan avulla:

$$t_{\text{pinta}} = t_{\text{ylä}} - (t_{\text{ala}} - t_{\text{ylä}})/2 = 3t_{\text{ylä}}/2 - t_{\text{ala}}/2$$

Tämä kaava on johdettu olettaen, että kuparikappaleen lämmönjohtavuus on vakio, jolloin lämpötila kuparikappaleen sisällä muuttuu lineaarisesti.

Ennen kalibrointitulosten laskentaa täytyy kirjoittaa täsmällisempi malli.

Malli

Referenssilämpötila on pinnan lämpötila:

$$t_{\text{pinta}} = 3t_{\text{ylä}}/2 - t_{\text{ala}}/2 + \delta t_{\text{pinta}} + \delta t_{\text{calala}} + \delta t_{\text{calylä}} + \delta t_{\text{ref}} + \delta t_{\text{grad}} + \delta t_{\text{DVM}} + \delta t_{\text{res}}$$

Tässä

- δt_{calala} on alemman termoelementin kalibroinnin mukainen korjaus
- $\delta t_{\text{calylä}}$ on ylemmän termoelementin kalibroinnin mukainen korjaus
- δt_{pinta} on pinnan lämpötilan huojunnasta johtuva korjaus
- δt_{ref} on termoelementtien kylmän pään lämpötilasta johtuva korjaus
- δt_{grad} on pinnan lämpötilagradienteista johtuva korjaus
- δt_{DVM} on volttimittarin kalibroinnin mukainen korjaus
- δt_{res} on mittausohjelman resoluutiosta johtuva korjaus

Kalibroitavan pintalämpömittarin korjaus on

$$\Delta t = t_{\text{pinta}} - (t_{\text{kal}} + \delta t_{\text{joht}} + \delta t_{\text{kosk}} + \delta t_{\text{toist}} + \delta t_{\text{kalres}})$$

missä

- t_{kal} on kalibroitavan mittarin näyttämä
- δt_{joht} on kalibroitavan mittarin lämmönjohtavuudesta johtuva korjaus
- δt_{kosk} on kalibroitavan mittarin kosketuksesta johtuva korjaus

δt_{toist} on kalibroitavan mittarin toistuvuudesta johtuva korjaus

δt_{kalres} on kalibroitavan mittarin näytön resoluutiosta johtuva korjaus

Epävarmuusbudjetin osatekijät

Ylempi referenssianturi ($t_{\text{ylä}}$): lämpötilassa 300 °C ylemmän referenssianturin korjaus on 1,2 °C, ja kalibroinnin laajennettu epävarmuus on $\pm 0,3$ °C.

Epävarmuusbudjetin osatekijät

Ylempi referenssianturi ($t_{\text{ylä}}$): lämpötilassa 300 °C ylemmän referenssianturin korjaus on 1,2 °C, ja kalibroinnin laajennettu epävarmuus on $\pm 0,3$ °C.

Alempi referenssianturi (t_{ala}): lämpötilassa 300 °C alemman referenssianturin korjaus on 1,4 °C, ja kalibroinnin laajennettu epävarmuus on $\pm 0,3$ °C.

Kylmän pään lämpötila (t_{ref}): kylmän pään lämpötila arvioidaan olevan 0 °C epävarmuudella 0,005 °C.

Lämpölevyn pinnan lämpötila (δt_{grad}): lämpölevyn pinnan lämpötilagradientit arvioidaan olevan 0 epävarmuudella 0,3 °C.

Jännitemittarin kalibrointi (δt_{DVM}): Jännitemittarin kalibrointiepävarmuus on 0,0007 mV ($k=2$). K-tyyppin termoelementin herkkyys lämpötilassa 300 °C on 41,4 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$.

Mittaussysteemin resoluutio (δt_{res}): Mittaussysteemi muuttaa mitatun termojännitteen lämpö-tilaksi. Lämpötila tallentuu neljän desimaalin tarkkuudella, joten resoluutiosta johtuva epävarmuus on $0,0001\text{ }^\circ\text{C}/\sqrt{3} = 0,00006\text{ }^\circ\text{C}$. Tämä epävarmuuskomponentti on hyvin pieni muihin verrattuna.

Kalibroitavan anturin lämmönjohtavuus (δt_{joht}): Mittaamalla ilman lämpötila pinnan yläpuolella ja anturin lämpötila samalla korkeudella on todettu, että anturin lämmönjohtuvuudesta aiheutuva pinnan lämpötilan lasku on $2,3\text{ }^\circ\text{C} \pm 0,5\text{ }^\circ\text{C}$.

Kalibroitavan mittarin kosketus pintaan (δt_{kosk}): Jos pintalämpömittari koskettaa pintaa, niin että anturin pää on vinossa pintaan nähden, saattaa tästä johtuva mittausrvirhe olla useita asteita. Tässä kalibroinnissa oli käytettävissä laitteisto, joka pitää pintalämpömittarin oikeassa kulmassa, joten kulmavirheestä ja pinnan karheudesta johtuva epävarmuus on 0,01 °C (arvio).

Kalibrointituloksen toistuvuus (δt_{toist}): Kun mittausta toistettiin muutaman päivän kuluttua (kalibroitava laite välillä poistettu pinnalta ja kiinnityslaitteesta) on toistuvuus $\pm 1,1\text{ }^\circ\text{C}$. Tästä johtuva epävarmuus on $1,1\text{ }^\circ\text{C}/\sqrt{3} = 0,635\text{ }^\circ\text{C}$.

Kalibroitavan mittarin resoluutio (δt_{kalres}): näytön resoluutiosta johtuva korjaus on 0 ja standardiepävarmuus on $0,1\text{ }^\circ\text{C}/\sqrt{3} = 0,058\text{ }^\circ\text{C}$ (tasajakauma).

Taulukko 13.5.1

Pinnan lämpötilan epävarmuuslaskenta

Suure X_i	Arvio x_i	Standardi- epävarmuus $u(x_i)$	Jakauma	Herkkyyskerroin C_i	Epävarmuustekijä $u_i=C_i \cdot u(x_i)$
$t_{ylä}$	288,702 °C	0,089 °C	normaali	1	0,089 °C
t_{ala}	288,877 °C	0,098 °C	normaali	1	0,098 °C
δt_{calv}	1,2 °C	0,15 °C	normaali	1	0,15 °C
δt_{calala}	1,4 °C	0,15 °C	normaali	1	0,15 °C
δt_{ref}	0 °C	0,005 °C	tasa	0,95 ^a	0,003 °C
δt_{grad}	0 °C	0,173 °C	tasa	1	0,173 °C
δt_{DVM}	0 ^b V	0,045 μV	normaali	0,02415 °C/μV	0,011 °C
δt_{res}	0 °C	≈ 0 °C			
δt_{joht}	-2,3 °C	0,289 °C	tasa	1	0,289 °C
t_{pinta} ^c	286,558 °C				0,420 °C

^aK-tyypin termoelementin Seebeck-kerroin on lämpötilassa 300 °C 41,4 μV/°C ja lämpötilassa 0 °C 39,5 μV/°C. Herkkyyskerroimeksi saadaan siten $39,5/41,1 = 0,95$.

^bDVM:n kalibroitikorjaus on huomioitu mittaussysteemissä.

^c $t_{pinta} = 288,702 \text{ °C} + 1,2 \text{ °C} - (288,877 \text{ °C} + 1,4 \text{ °C} - (288,702 \text{ °C} + 1,2 \text{ °C})/2 + (-0,032 \text{ °C}) + (-2,3 \text{ °C})) = 286,558 \text{ °C}$

Laajennettu epävarmuus = $2 \times 0,420 \text{ °C} \approx 0,84 \text{ °C}$

Taulukko 13.5.2

Pintalämpömittarin epävarmuuslaskenta

Suure X_i	Arvio x_i	Standardiepävar- muus $u(x_i)$	Jakauma	Herkkyyskerroin C_i	Epävarmuustekijä $u_i(y)=C_i \cdot u(x_i)$
t_{pinta}	286,558 °C	0,42 °C	normaali	1	0,42 °C
t_{kal}	290,72 °C	0,21 °C	normaali	1	0,21 °C
δt_{kosk}	0 °C	0,006 °C	tasa	1	0,006 °C
δt_{toist}	0 °C	0,635 °C	tasa	1	0,635 °C
δt_{kalres}	0 °C	0,058 °C	tasa	1	0,058 °C
Δt	-4,16 °C				0,792 °C

laajennettu epävarmuus = $2 \times 0,792 \text{ °C} \approx 1,58 \text{ °C}$

Tulos:

Pinnan lämpötila	Kalibroitavan mittarin näyttämä	Kalibroinnin epävarmuus ($k = 2$)
286,6 °C	290,7 °C	1,6 °C

Kun pintalämpömittaria käytetään pinnan lämpötilan mittaamiseen tulee epävarmuuksia lisää johtuen esim. seuraavista tekijöistä: mittarin vinous, pinnan rosoisuus, konvektio (ilmavirrat, tuuli). Pintalämpömittarin lämmönjohtavuus alentaa tässäkin tapauksessa pinnan lämpötilaa.

LIITE 1: Kalibrointitulosten käyttö

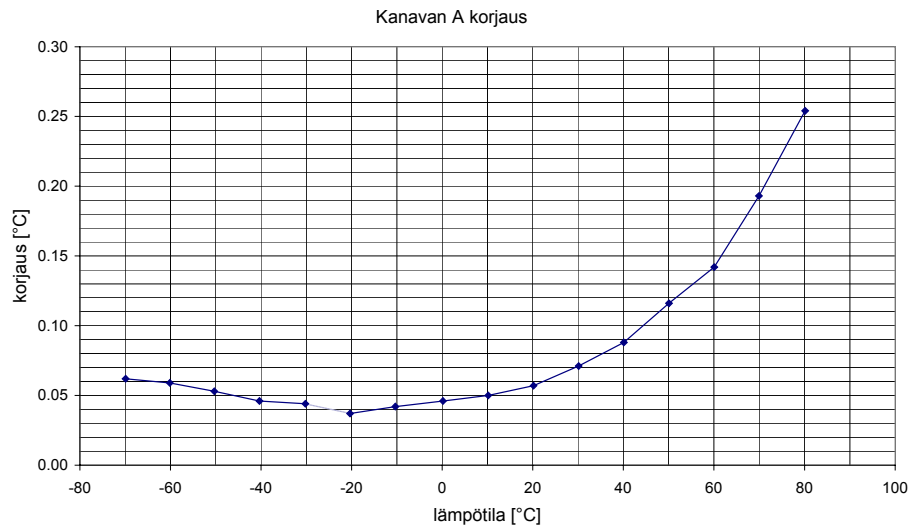
Kalibrointitodistuksen tärkein sisältö muodostuu kalibrointituloksista.

Kalibrointipäivämäärä	18.1...24.1.2000
Kalibroitu laite	Digitaalilämpömittari
Tyyppi	ASL F 250
Valmistusnumero	1365 030 997
Resoluutio	0,001°C
Anturin tyyppi	Pt100 Ω/0 °C, S935-0
Kalibroija	HR

Kalibrointitulokset

Mittanormaanin näyttämä = kalibrointiläm- pötila [°C]	Kalibroitavan lämpömittarin näyttämä				Kalibrointi- epävarmuus ($k=2$) [°C]
	Kanava A [°C]	Kanava A [Ω]	Kanava B [°C]	Kanava B [Ω]	
-69,896	-69,958	72,351	-69,928	72,363	±0,020
-60,145	-60,204	76,246	-60,176	76,257	±0,020
-50,311	-50,364	80,162	-50,336	80,172	±0,020
-40,351	-40,397	84,114	-40,370	84,124	±0,020
-30,216	-30,260	88,119	-30,234	88,128	±0,020
-20,352	-20,389	92,007	-20,362	92,017	±0,015
-10,343	- 10,385	95,935	-10,352	95,948	±0,015
+0,156	+0,110	100,042	+ 0,146	100,055	±0,015
+10,159	+10,109	103,944	+10,151	103,960	±0,015
+20,165	+20,108	107,834	+20,151	107,852	±0,015
+30,125	+30,054	111,694	+30,115	111,717	±0,015
+40,101	+40,013	115,544	+40,086	115,573	±0,015
+50,072	+49,956	119,380	+50,045	119,415	±0,020
+60,072	+59,930	123,216	+60,044	123,258	±0,020
+69,946	+69,753	126,980	+69,909	127,041	±0,020
+80,132	+79,878	130,850	+80,090	130,930	±0,020

Alhaalla on kanavan A korjaus lämpötilan funktiona piirretty. Jos mittarin näyttämä (anturi kanavassa A) on 53,751 °C, pystyy kuvion avulla lukemaan vastaavan korjauksen: 0,125 °C. Mitattu lämpötila on siis 53,751 °C + 0,125 °C = 53,876 °C.



Tarkemman tuloksen saa tekemällä sovituksen, joka laskee korjauksen lämpötilan funktiona.

LIITE 2: Pt100-antureiden laskentakaavat

$$\text{Lämpötila-alue } -200 \text{ }^\circ\text{C} \dots 0 \text{ }^\circ\text{C}: \quad R_t = R_0 [1 + At + Bt^2 + C(t - 100 \text{ }^\circ\text{C})t^3] \quad (1)$$

$$\text{Lämpötila-alue } 0 \text{ }^\circ\text{C} \dots 850 \text{ }^\circ\text{C} \quad R_t = R_0 (1 + At + Bt^2) \quad (2)$$

Tässä

$$A = 3,9083 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

$$B = -5,775 \times 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-2}$$

$$C = -4,183 \times 10^{-12} \text{ }^\circ\text{C}^{-4}$$

Kaavasta (2) on lämpötila ratkaistavissa helposti (toisen asteen yhtälö). Kirjoitetaan se muotoon

$$t^2 + A/B t + (1 - R_t/R_0)/B = 0$$

jonka ratkaisu on $t = -A/2B \pm [(A/2B)^2 - (1 - R_t/R_0)/B]^{1/2}$. Jos esim. $R_t = 140,0 \text{ } \Omega$ ja $R_0 = 99,7 \text{ } \Omega$ saadaan

$$t = \frac{-3,9083 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}}{2 \times (-5,775 \times 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-2})} \pm \sqrt{\left[\frac{3,9083 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}}{2 \times (-5,775 \times 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-2})} \right]^2 - \frac{1 - 140,0 \text{ } \Omega / 99,7 \text{ } \Omega}{-5,775 \times 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-2}}}$$

Yhtälöllä on kaksi ratkaisua: $t_1 = 6662,564 \text{ }^\circ\text{C}$ ja $t_2 = 105,055 \text{ }^\circ\text{C}$. Näistä t_1 ei ole tässä tapauksessa fyysikaalisesti mielekäs ratkaisu, joten haettu lämpötila on $105,055 \text{ }^\circ\text{C}$.

Kaavasta (1) pitää ratkaista lämpötila iterointimenetelmällä:

Olkoon $R = 88,0 \text{ } \Omega$ ja $R_0 = 99,7 \text{ } \Omega$. Kokeillaan, olisiko yhtälön (1) ratkaisu $t = -30 \text{ }^\circ\text{C}$. Sijoitetaan R_0 ja t yhtälöön (2) ja lasketaan R (tällainen iterointi on helppo tehdä esim. taulukkolaskentaohjelmalla).

t (°C)	R (Ω)
-30	87,9570
-29	88,3502
-29,5	88,1536
-29,9	87,9963
-29,85	88,0160
-29,86	88,0120
-29,87	88,0081
-29,88	88,0042
-29,89	88,0003
-29,895	87,9983
-29,892	87,9995
-29,891	87,9999
-29,8905	88,0001
-29,8903	88,0001
-29,8906	88,0000

Kalibroidun anturin todistuksessa saattaa olla yo. kaavat, joihin kalibroinnin tulosten perusteella on laskettu uudet vakiot.

Lähde: CEI/IEC 751 Amendment 2 1995-07: Industrial platinum resistance thermometer sensors

LIITE 3: K-tyyppin termoelementin laskentakaavat

K-tyyppin termoelementin tuottama sähkömotorinen voima lasketaan lämpötilan 0 °C alapuolella kaavasta

$$E = \sum_{i=0}^n c_i (t_{90})^i.$$

Lämpötilan 0 °C yläpuolella laskentakaava on

$$E = \sum_{i=0}^n c_i (t_{90})^i + \alpha_0 e^{\alpha_1 (t_{90} - 126,9686)^2}$$

Näissä kaavoissa E :n yksikkö on mikrovolti, ja lämpötilan t_{90} yksikkö on °C.

Lämpötila-alue	Kertoimet		
		c_0	0,000 000 000 0...
	c_1	$3,945 012 802 5 \times 10^1$	
	c_2	$2,362 237 359 8 \times 10^{-2}$	
	c_3	$-3,285 890 678 4 \times 10^{-4}$	
	c_4	$-4,990 482 877 7 \times 10^{-6}$	
-270 °C ... 0 °C	c_5	$-6,750 905 917 3 \times 10^{-8}$	
	c_6	$-5,741 032 742 8 \times 10^{-10}$	
	c_7	$-3,108 887 289 4 \times 10^{-12}$	
	c_8	$-1,045 160 936 5 \times 10^{-14}$	
	c_9	$-1,988 926 687 8 \times 10^{-17}$	
	c_{10}	$-1,632 269 748 6 \times 10^{-20}$	
		c_0	$-1,760 041 368 6 \times 10^1$
		c_1	$3,892 120 497 5 \times 10^1$
		c_2	$1,855 877 003 2 \times 10^{-2}$
		c_3	$-9,945 759 287 4 \times 10^{-5}$
	c_4	$3,184 094 571 9 \times 10^{-7}$	
0 °C ... 1372 °C	c_5	$-5,607 284 488 9 \times 10^{-10}$	
	c_6	$5,607 505 905 9 \times 10^{-13}$	
	c_7	$-3,202 072 000 3 \times 10^{-16}$	
	c_8	$9,715 114 715 2 \times 10^{-20}$	
	c_9	$-1,210 472 127 5 \times 10^{-23}$	
	α_0	$1,185 976 \times 10^2$	
	α_1	$-1,183 432 \times 10^{-4}$	

Käänteisfunktio: $t_{90} = c_0 + c_1 E + c_2 E^2 + \dots + c_i E^i$

Lämpötila-alue	-200 °C ... 0 °C	0 °C ... 500 °C	500 °C ... 1372 °C
Jännitealue	-5891 μV ... 0 μV	0 μV ... 20644 μV	20644 μV ... 54886 μV
C_0	0,000 000 0 ...	0,000 000 0 ...	$-1,318 058 \times 10^2$
C_1	$2,517 346 2 \times 10^{-2}$	$2,508 355 \times 10^{-2}$	$4,830 222 \times 10^{-2}$
C_2	$-1,166 287 8 \times 10^{-6}$	$7,860 106 \times 10^{-8}$	$-1,646 031 \times 10^{-6}$
C_3	$-1,083 363 8 \times 10^{-9}$	$-2,503 131 \times 10^{-10}$	$5,464 731 \times 10^{-11}$
C_4	$-8,977 354 0 \times 10^{-13}$	$8,315 270 \times 10^{-14}$	$-9,650 715 \times 10^{-16}$
C_5	$-3,734 237 7 \times 10^{-16}$	$-1,228 034 \times 10^{-17}$	$8,802 193 \times 10^{-21}$
C_6	$-8,663 264 3 \times 10^{-20}$	$9,804 036 \times 10^{-22}$	$-3,110 810 \times 10^{-26}$
C_7	$-1,045 059 8 \times 10^{-23}$	$-4,413 030 \times 10^{-26}$	
C_8	$-5,192 057 7 \times 10^{-28}$	$1,057 734 \times 10^{-30}$	
C_9		$-1,052 755 \times 10^{-35}$	
Approksimaatiosta aiheutuva virhe	0,04 °C ... -0,02 °C	0,04 °C ... -0,05 °C	0,06 °C ... -0,05 °C

Kalibroidun K-tyypin termoelementin todistuksessa saattaa olla kalibrointilämpötilat ja vastaavat termojännitteet. Jos sitten haluaa käyttää yo. kaavoja, ei näin hankalassa tapauksessa kannata lähteä laskemaan uusia kertoimia. (Huom: esim. lämpötila-alueella 0 °C ... 500 °C on 10 vakiota. Jos näitä halutaan laskea uudestaan pitäisi kalibrointipisteiden lukumäärä olla ≥ 21 .)

Tässä vaiheessa tarvitaan jompikumpi tämän luvun lopussa olevista standardeista. Valitaan esim. CEI/IEC 584-1:1995.

K-tyypin anturin kalibrointitodistuksessa on seuraavat tulokset:

Kalibrointilämpötila	Mitattu termojännite
100,1 °C	4115 μV
200,3 °C	8196 μV
299,7 °C	12271 μV
401,0 °C	16525 μV
495,6 °C	20610 μV

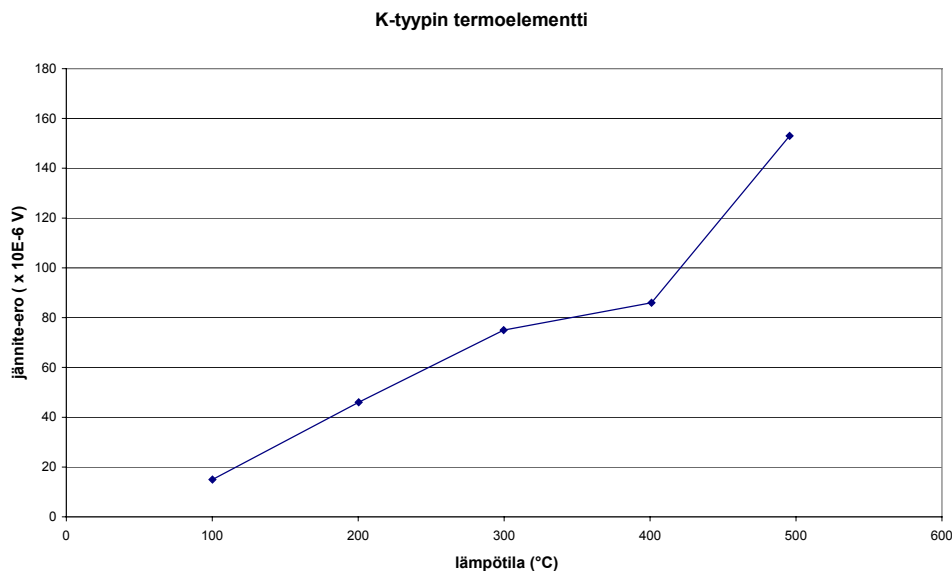
Tehdään taulukko, missä on mukana standardin arvot:

Lämpötilaa 100,1 °C vastaava standardin mukainen jännite on (s. 95): $4096 \mu\text{V} + 0,1 \text{ °C} \times \Delta\mu\text{V}/\Delta\text{°C} = 4096 \mu\text{V} + 0,1 \times (4138 \mu\text{V} - 4096 \mu\text{V}) / (101 \text{ °C} - 100 \text{ °C}) = 4100 \mu\text{V}$.

Kalibrointi-lämpötila	Mitattu jännite	Kalibrointilämpötilaa vastaava standardin mukainen jännite	Mitattu jännite – standardin mukainen jännite
100,1 °C	4115 μV	4100 μV	15 μV
200,3 °C	8196 μV	8150 μV	46 μV
299,7 °C	12271 μV	12196 μV	75 μV
401,0 °C	16525 μV	16439 μV	86 μV
495,6 °C	20610 μV	20457 μV	153 μV

Tehdään jännite-eroille sovituskäyrä:

Mikä on termoelementin lämpötila, kun termojännite on 10267 μV?



Sovitusta käytetään näin:

- Katsotaan ensin standardista mitä lämpötilaa 10267 μV vastaa. Lämpötila 252 °C vastaa jännitettä 10235 μV ja lämpötila 253 °C jännitettä 10276 μV. Mitattu lämpötila oli siten standardin mukaan $252\text{ °C} + (10267\text{ μV} - 10235\text{ μV}) \times \Delta\text{°C}/\Delta\text{μV} = 252\text{ °C} + (10267\text{ μV} - 10235\text{ μV}) \times 1\text{ °C}/(10276\text{ μV} - 10235\text{ μV}) = 252,8\text{ °C}$.
-
- Tehdään vielä kalibrointitodistuksen mukainen korjaus: termoelementin tuottama jännite on isompi kuin standardissa oleva jännite, joten standardin mukaisesti laskettu lämpötila on liian korkea.
-
- Paljonkohan siitä pitää vähentää? Sovituksesta näemme, että lämpötilassa 250 °C on termojännite n. 60 μV liian korkea. Tässä lämpötilassa 60 μV vastaa lämpötilaeroa $60\text{ μV}/(41\text{ μV}/1\text{ °C}) = 1,5\text{ °C}$. Mitattu lämpötila oli siis $252,8\text{ °C} - 1,5\text{ °C} = 251,3\text{ °C}$.

Lähteet:

NIST Monograph 175, Temperature-Electromotive Force Reference Functions and Tables for the Letter-Designated Thermocouple Types Based on the ITS-90

CEI/IEC 584-1:1995 Thermocouples, Part 1: Reference tables

Hakemisto

akkreditoitu kalibrointilaboratorio	s. 7
2-johdinkytkentä	s. 37
2-väripyrometri	s. 45
3-johdinkytkentä	s. 37
4-johdinkytkentä	s. 37
askelarvo	s. 18
autoklaavi	s. 57
block calibrator	s. 51
B-tyyppin termoelementti	s. 24
digitaalinen lämpömittari = digitaalilämpömittari	s. 65, 76, 82
emissiivisyys =emissiokerroin	s. 42, 43, 44
epävarmuus	s. 11
eristysvastus	s. 36
erotuskyky = resoluutio	s. 69
E-tyyppin termoelementti	s. 24
galvanometri	s. 22
herkkyyskerroin	s. 14
hystereesi	s. 54
infrapunalämpömittari	s. 41
itselämpeneminen	s. 37
J-tyyppin termoelementti	s. 24
jäljitettävyys	s. 7
kalibraattori	s. 51, 70
kalibrointi	s. 7
kattavuuskerroin	s. 13
keskiarvon keskihajonta	s. 11
kokonaissäteilypyrometri	s. 45
konvektio	s. 61, 89
korjaus	s. 9
kuituoptiikka	s. 45
kulta-platina termoelementti	s. 24
K-tyyppin termoelementti	s. 24
kylmän pään kompensointi = kylmäpistekompensointi	s. 23, 69
laajennettu epävarmuus	s. 13
lasilämpömittari	s. 17
L-tyyppin termoelementti	s. 24
lämpökaappi	s. 57
lämpökamera	s. 46
lämpösäteily	s. 41
mittanormaali = referenssimittari	s. 81
mittauserpävarmuus	s. 12
mittaustulos	s. 13, 19
mustan kappaleen säteilijä	s. 41
normaalijakauma	s. 13
N-tyyppin termoelementti	s. 24
osittaissäteilypyrometri	s. 45
pintalämpömittari	s. 61

platina-palladium termoelementti	s. 24
Pt100-anturi	s. 35
pyrometri	s. 41
resoluutio	s. 82
referenssimittari	s. 77
R-tyypin termoelementti	s. 24
Seebeck kerroin	s. 25
simulointikalibrointi = sähköinen kalibrointi	s. 65
standardiepävarmuus	s. 11
S-tyypin termoelementti	s. 24
suhdepyrometri	s. 45
systemaattinen virhe	s. 11
säteilyenergia	s. 41
tasajakauma	s. 13
termoelementti	s. 21
termojännite	s. 22
tyypin A epävarmuustekijä	s. 11
tyypin B epävarmuustekijä	s. 12
T-tyypin termoelementti	s. 24
upotussyvyys	s. 17, 77
U-tyypin termoelementti	s. 28
validointi	s. 57
vasteaika	s. 77
vastuslämpömittari	s. 35
viiden prosentin sääntö	s. 15
virhe	s. 9
yhdistetty epävarmuus	s. 13

- J1/1999 Nordic Intercomparison in Barometric Pressure
- J2/1999 Automaattisten punnustenvaihtimien suunnittelu, toteutus ja käyttö
- J3/1999 Intercomparison of Gauge Pressure Measurements between SP/FFA and MIKES in the Range 32 kPa ... 132 kPa
- J4/1999 Ainemäärän kansallisen mittanormaalijärjestelmän toteuttamista ja organisaatiota koskeva selvitys
- J5/1999 Mikrobiologisen metrologian tilanneselvitys ja kehittämissuunnitelma
- J6/1999 Finnish National Standards Laboratories FINMET. Annual Report 1998
- J7/1999 Lämpötilan vertailumittaus L10, S-tyypin termoelementin kalibrointi
- J8/1999 Mekaanisten värähtelyiden mittausten kartoitus
- J9/1999 Intercomparison of the Hydrometer Calibration Systems at the IMGCC and the MIKES
- J10/1999 National Basis for Traceability in Humidity Measurements
- J1/2000 Intercomparison of Temperature Standards of Lithuania and Finland
- J2/2000 Finnish National Standards Laboratories FINMET. Annual Report 1999
- J3/2000 Mass Comparison M3
- J4/2000 Mass and Volume Comparisons at MIKES
- J5/2000 Nanometritason mittaukset, kartoitus
- J6/2000 Nordic Intercomparison in Gauge Pressure Range 0 ... 2 MPa
- J1/2001 Mikrobiologian kvantitatiivisten viljelymääritysten mittausepävarmuus
- J2/2001 Finnish National Standards Laboratories. Annual Report 2000
- J3/2001 Lämpötilan vertailumittaus L11, PT100-anturin sovitussuunnitelman kehittäminen
- J4/2001 High Precision Roundness. Euromet Project 533. Final Report
- J5/2001 Kaasun kosteuden mittaaminen
- J6/2001 Intercomparison of Humidity Standards
- J7/2001 Comparisons in the Pressure Range from 50 kPa to 350 kPa
- J1/2002 Lämpötilan mittaus

Tilaukset toimistosihteerille Kirsi Tuomisto, puh. (09) 6167 457,
e-mail kirsi.tuomisto@mikes.fi.