

SILINDRILISE KIHII SOOJUSJUHTIVUSTEGURI MÄÄRAMINE

1. Töö eesmärk

Määrata soojusvoomõõturiga kaugküttetoru soojuskadu ja arvutada selle põhjal isoleeritud toru soojuslik takistus R .

2. Tööks vajalikud vahendid

1. Soojusisolatsiooniga kaetud seest kütav toru;
2. Muuttrafo;
3. K-tüüpi termopaarid;
4. Soojusvoomõõtur;
5. Pinget mõõtev arvutiliides;

3. Katseseadme skeem ja tööpõhimõtte kirjeldus

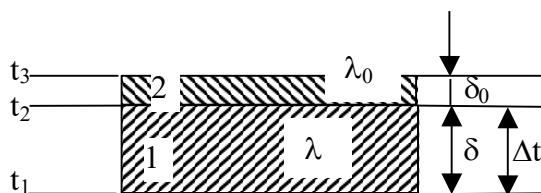
Painduvat soojusvoomõõturit „Hukseflux BS01 belt heat flux sensor“ kasutatakse peamiselt soojuskadude mõõtmiseks läbi torude seinte ning saab kasutada ka isolatsioonimaterjali soojusjuhtivusteguri määramiseks. Seadme talitluspõhimõtte seisneb selles, et soojusvoo asemel läbi mõõdetava kihi paksusega δ mõõdetakse tegelikult praktiliselt võrdset soojusvoogu läbi soojusvoomõõturiga abikihi, mille paksus δ_0 ja soojusjuhtivustegur λ_0 on teada (joonis 7.1). Eeldusel, et isolatsioonikihi termiline takistus $R = \delta/\lambda$ on palju suurem kui abikihil $R_0 = \delta_0/\lambda_0$ võib viimast mitte arvestada. Soovituslik on, et $R > R_0 \cdot 100$.

Kui mõõta temperatuurid t_2 ja t_3 või nende vahe Δt_0 , siis

$$q = \frac{\lambda_0}{\delta_0} (t_2 - t_3) = \frac{\lambda_0}{\delta_0} \Delta t_0 \quad \text{W/m}^2, \quad (7.1)$$

või teades abikihi ehk soojusvoomõõturi kalibreerimisteguri C_{andur} väärtust ning mõõtes anduri väljundpinget U .

$$q = C_{andur} \cdot U \quad \text{W/m}^2 \quad (7.2)$$



Joonis 7.1. Kihtide asetuse skeem: 1 – mõõdetav kiht; 2 – soojusvoomõõturiga abikiht.

Termiliselt statsionaarses olukorras läbib mõlemat kihti üks ja seesama soojusvoog. Kui mõõta täiendavalt temperatuurid t_1 ja t_2 või nende vahet Δt , saab määrata põhiseina materjali soojusjuhtivusteguri

$$\lambda = \frac{q \delta}{t_1 - t_2} = \frac{q \delta}{\Delta t} \quad \text{W/(m} \cdot \text{K)} \quad (7.3)$$

Abikihi olemasolu tõttu mõõdetakse soojusvoogu teatud veaga. Vea suuruse määrab põhiseina termilise takistuse suhe põhiseina, abikihi ja nende kokkupuutekoha termilise takistuse

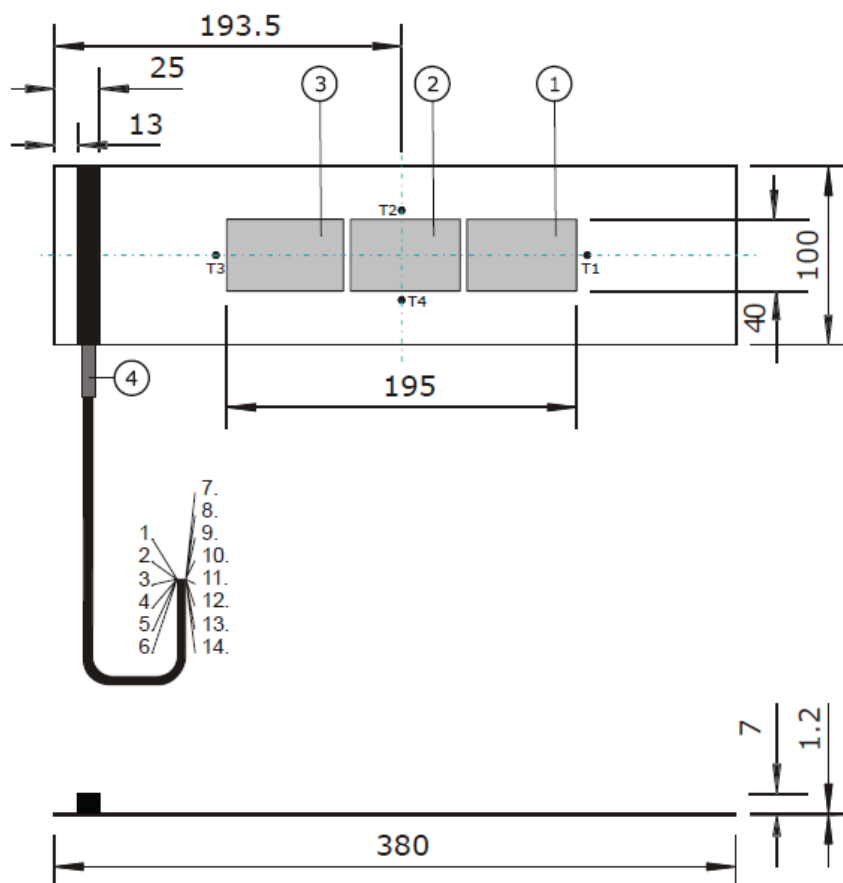
summasse. Mõõdetav soojusvoog on seega alati väiksem kui tegelik soojusvoog, kuid see ei avalda mõju soojusjuhtivusteguri määramise täpsusele võrrandi (7.3) järgi.

Kõige suurema mõõtmisvea annab mõõdetava pinna ja mõõtevöö vahelise termilisest kontaktist tingitud termiline takistus, mida on aga raske mõõta ja hinnata. See on tingitud õhu väikesest soojusjuhtivusest ($\lambda_{\delta} \approx 0,02 \text{ W/mK}$) ja toru ning mõõtevöö pindade krobelisusest tingitud mittetäielikust kontaktist.

Teades põhiseina soojusjuhtivustegurit, võib määrata ka soojusvoo, mis esineb täiendava kihi puudumise korral. Selleks on tarvis mõõta temperatuurid t_1 ja t_2 termiliselt statsionaarses olukorras täiendava kihi puudumisel, mil tekkinud soojusvoog on

$$q' = \frac{\lambda}{\delta} (t_1 - t_2) \quad \text{W/m}^2 \quad (7.4)$$

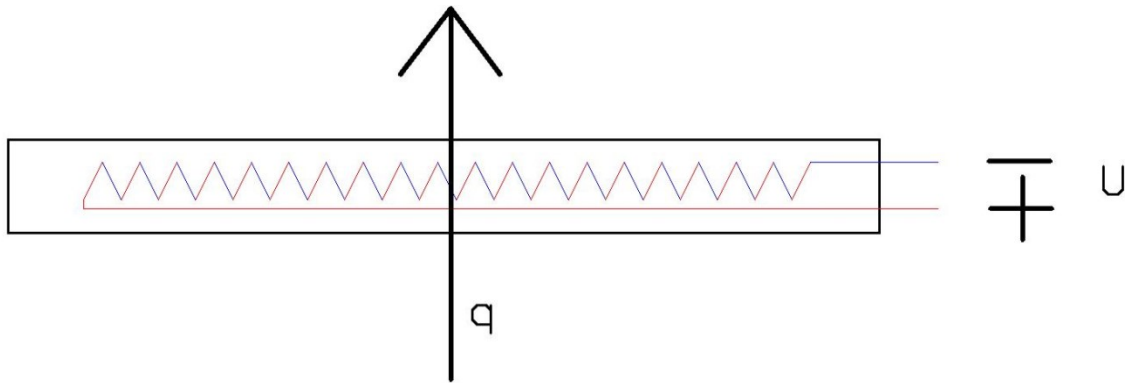
Katses kasutatav soojusvooandur on valmistatud plastist vööna, mille mõõtmel on toodud joonisel 7.2. Vöös on 3 eraldi soojusvooandurit. Silindrilise objekti (soojusisolatsiooniga toru) ümber paigutatuna moodustab see mõõtur ülalkirjeldatud abikihi. Temperatuurivahet vöö paksusel Δt_0 mõõdetakse jadalülituses termopaaridest moodustatud termopatarei abil (joonis 7.3).



Joonis 7.2. Soojusvooanduri BS-01 mõõtmel ja komponentide asetus. 1,2,3 – soojusvooandurid; 4 – kaabel anduritest mõõteriista. T_1 , T_2 , T_3 ja T_4 on vöö temperatuuri mõõtvate termopaaride asukohad. (Hukseflux Thermal Sensors)

Iga soojusvooandur mõõtevöös koosneb tuhandetest jadamisi ühendatud termopaaridest, mistõttu ka väga väike temperatuurivahe annab tavalise millivoltmeetriga mõõdetava

termopinge. Kuna $\lambda_0=0,2\text{W/mK}$ ja $\delta_0=1,2\text{mm}$ on konstantsed, siis vastavalt võrrandile (7.1) on q võrdeline vahega Δt_0 . Järelikult millivoltmeetri näidu U ja soojusvoo mõõtmise kalibreerimisteguri C_{andur} korrutamisel saame soojusvoo q läbi vöö keskpinna pinnaühiku. Tegur C_{andur} sõltub vöö keskmisest temperatuurist t_{mv} , mida mõõdetakse vöös oleva nelja termopaari abil (T_1, T_2, T_3 ja T_4 joonisel 7.2), ja võetakse arvesse valemiga 7.5. Andurid on kalibreeritud 20°C juures ja omavad väljundpinge sõltuvust temperatuuri tõusule $0,17\%/^\circ\text{C}$. Andurite kalibreerimistulemused on ära toodud tabelis 7.1. Soojusvoo mõõtmise termiline takistus on $R_0=6\cdot 10^{-3}\text{K}\cdot\text{m}^2/\text{W}$.



Joonis 7.3. Anduri põhimõtteline läbilõige. Sinine joon ja punane joon näitab erinevat kasutatava materjali paigutust termopatareis ehk jadamisi ühendatud termopaaris.

Andurit läbinud soojusvoog

$$q = C_{andur} U (1 + 0,0017(t_{mv} - 20)) \text{ W/m}^2 \quad (7.5)$$

Isoleeritud toru kui silindrilise süsteemi korral on otstarbekas avaldada soojuskadu toru jooksva meetri kohta

$$q_l = \pi d_{välis} q = \pi d_{välis} C_{andur} U (1 + 0,0017(t_{mv} - 20)) \text{ W/m} \quad (7.6),$$

kus $d_{välis}$ – on isoleeritud toru välispinna läbimõõt, m.

Isoleeritud toru soojuskadu meetri kohta sõltuvana temperatuuri erinevusest toru sees ja väljas, U -arv

$$U = \frac{q_l}{\Delta T} \text{ W/(m} \cdot \text{K)} \quad (7.7)$$

Soojusvoogu läbi katses kasutatud eel isoleeritud kaugküttevõrgu toru saab avaldada ka erinevate materjalikihtide soojusjuhtivusi ja paksusi kasutades

$$q_l = \frac{2\pi(t_{sise} - t_{välis})}{\frac{1}{\lambda_{teras}} \ln \frac{d_{PU_{sise}}}{d_{sise}} + \frac{1}{\lambda_{PU}} \ln \frac{d_{PU_{välis}}}{d_{PU_{sise}}} + \frac{1}{\lambda_{PEHD}} \ln \frac{d_{välis}}{d_{PU_{välis}}}} \text{ W/m}^2, \quad (7.8)$$

kus λ_{teras} – terase soojusjuhtivustegur, W/mK ;

d_{sise} – on terasest toru sisepinna läbimõõt, m;

$d_{PU_{sise}}$ – on toru polüuretaanist isolatsiooni sisepinna läbimõõt, m;

λ_{PU} – polüüretaani soojusjuhtivustegur, W/mK;

$d_{PU_{välis}}$ – on toru polüüretaanist isolatsiooni välispinna läbimõõt, m;

λ_{PEHD} – polüetüleen soojusjuhtivustegur, W/mK;

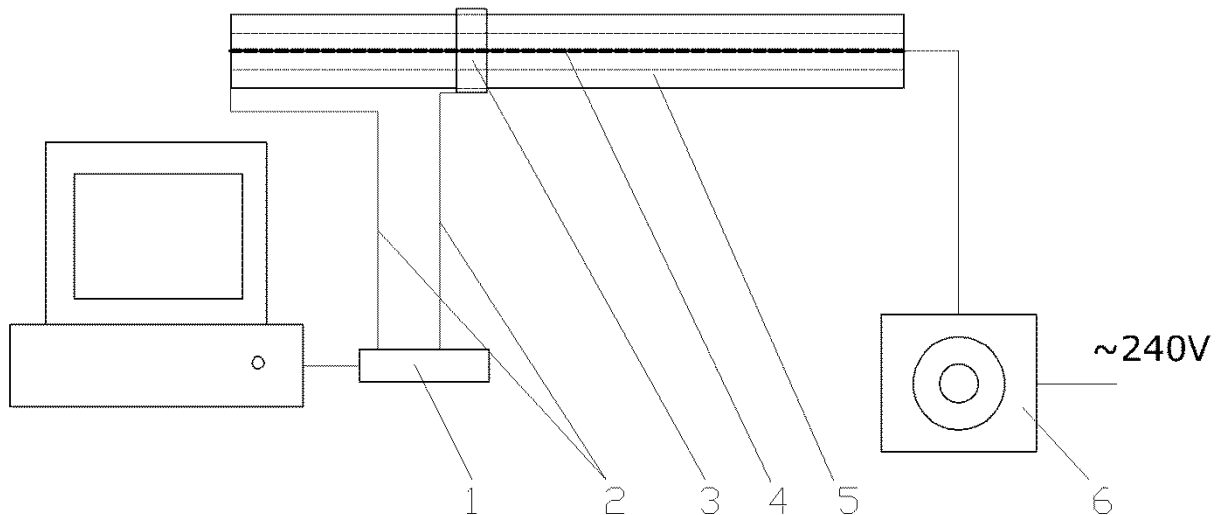
Toru termilist takistust on lihtsaim hinnata järgneva valemi abil:

$$R = \frac{\Delta t}{q} \text{ (K} \cdot \text{m}^2 \text{) / W} \quad (7.9)$$

Δt – sise- ja välistemperatuuri vahe, K;

q – andurit läbinud soojusvoog, W/m²;

Katseseade on kujutatud joonisel 7.4. Eelisolereitud kaugküttevõrgu toru 5 on seest täidetud õhuga ja õhus keset toru asub kaablikujuline elektriküttekeha 4. Toru pinnale on asetatud mõõtevöö 3. Mõõtevöö ja torul ning torus asetsevad termopaarid on ühendatud juhtmetega 2 arvutiliidesega 1, mille mõõdetud pingeid kuvatakse arvuti ekraanil. Küttekeha toitepinget ehk võimsust saab reguleerida muuttrafo 6 abil.



Joonis 7.4. Toruisolatsiooni soojusjuhtivusteguri määramise seadme skeem:
1 – mõõteriist arvutiliides; 2 – ühendusjuhtmed; 3 – mõõtevöö; 4 – küttekeha;
5 – isoleeritud toru; 6 – muuttrafo;

Eelisolereitud kaugküttevõrgu toru on valmistatud firma Logstor poolt ning selle ristlõige ja termopaaride asukoht on näidatud joonisel 7.5.

Toru terase mark on P235TR1/2 ($\lambda_{teras} = 51 \text{ W/mK}$),

isolatsioonimaterjaliks on polüüretaan (PU),

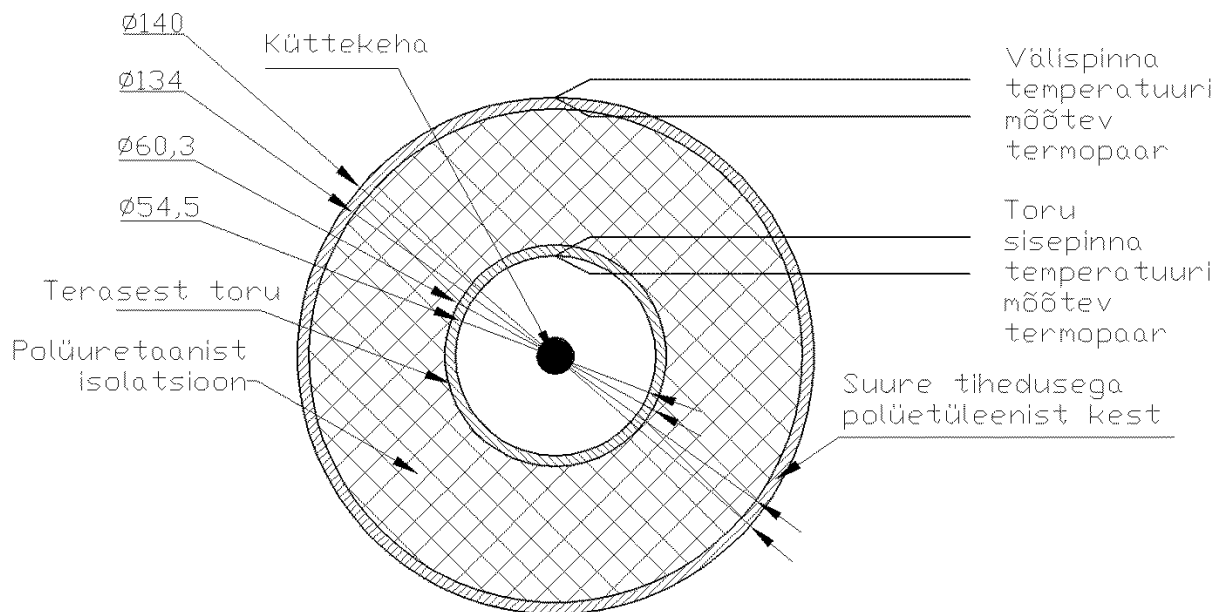
mis on kaetud suure tihedusega polüetüleen (PEHD) kihiga ($\lambda_{PEHD} = 0,43 \text{ W/mK}$).

Terasest toru sisepinna läbimõõt $d_{sise} = 54,5 \text{ mm}$;

Isolatsioonikihi sisediaameeter $d_{PU_{sise}} = 60,3 \text{ mm}$;

Isolatsioonikihi välisdiaameeter $d_{PU_{välis}} = 134 \text{ mm}$;

Kattekihi välisdiaameeter $d_{välis} = 140 \text{ mm}$.



Joonis 7.5. Eelisolereitud kaugküttevõrgu toru ristlõige.

4. Töö käik

Katse vältel hoitakse torus püsiv temperatuur, mis tagatakse küttevõimsuse konstantse hoidmisega. Näitusi registreeritakse õppejõu poolt ette antud aja vältel ja sagedusel. Mõõtmistulemused kirjutatakse õppejõult saadud tabelisse.

5. Katseandmete töötlemine

Mõõtetulemuste põhjal leitakse temperatuurid gradueerimistabelist (otsi internetist „thrmocouple type K tabel“) arvestades külmlühte temperatuuri parandit.

Soojusvoog leitakse iga anduri jaoks eraldi valemi 7.6 abil.

Leida polüuretaanist isolatsiooni soojusjuhtivustegur soojusvooandurite keskmise näidu põhjal (avaldata valem 7.8 abil).

Leida isoleeritud toru soojuskadu meetri kohta sõltuvana temperatuuri erinevusest toru sees ja väljas (valem 7.7), U-arv.

Arvutada katsetatava isoleeritud toru sein termiline takistus (valem 7.9) ja võrrelda seda mõõtevöö termilise takistusega ning hinnata antud seadme sobivust mõõdetud toru soojuskao mõõtmiseks.

Võrrelda saadud tulemusi toru tootja andmetega Logstor_ Pre-insulated pipes for industrial applications.pdf.

Tabel 7.1 Kalibratsioonitegurid

Andur	Tähis	Mõõtühik	Väärtus
1	C_{andur1}	W/m ² /mV	19,8
2	C_{andur2}	W/m ² /mV	19,9
3	C_{andur3}	W/m ² /mV	19,9

6. Kontrollküsimused

1. Missuguste materjalide soojusjuhtivusteguri määramine termilise takistuse seisukohalt annaks kirjeldatud meetodil tunduva vea?
2. Mida võtab arvesse kalibreerimistegur C_{andur} ?
3. Mida mõistetakse termiliselt statsionaarse olukorral all?
4. Millistes piirides on termisolatsioonmaterjali soojusjuhtivustegur?
5. Mida mõistetakse isolatsioonikihi kriitilise läbimõõdu all?

7. Kirjandus

1. Soojustehnika käsiraamat /koost. I.Mikk// Tallinn: Valgus. 1977. 619 lk.
2. Soojus- ja massilevi. I osa. Põhikursus. (koostajad – A.Paist, A.Poobus, T.Tiikma) TTÜ, 1998. 70 lk.
3. A. Ots. Soojustehnika aluskursus. TTÜ Kirjastus, 2011