

### VJEŽBA 3: ODREĐIVANJE TOPLINSKE VODLJIVOSTI IZOLACIJSKIH MATERIJALA

#### 8. OPĆENITO O PROVOĐENJU TOPLINE

Izmjena topline između tijela različitih temperatura vrši se na tri osnovna načina.

- izmjena topline konvekcijom
- izmjena topline provođenjem
- izmjena topline toplinskim zračenjem

Izmjena topline konvekcijom vrši se sudarom, odnosno međusobnim djelovanjem molekula različite prosječne brzine, pri čemu se kinetička energija molekula veće prosječne brzine uslijed sudara s molekulama manje prosječne brzine jednim dijelom pretvara u toplinsku energiju. Kod povezanih, ali ustitranih molekula krutih tijela i kod električnih izolatora provođenje topline vrši se longitudinalnim titrajima atoma, a kod električnih vodiča ono se vrši gibanjem elektrona. Takav intermolekularni način prijelaza topline zovemo provođenjem topline. Ono ovisi o fizikalnim svojstvima dotičnog tijela.

Održavajući na obje površine neke ravne stjenke stalne temperature  $\vartheta_1$  i  $\vartheta_2$ , po *Fourierovu* zakonu kroz stjenku prolazi toplina:

$$Q = \lambda \frac{\vartheta_1 - \vartheta_2}{d} At \quad (8.1)$$

Ovdje  $A$  označava površinu stjenke [ $\text{m}^2$ ],  $d$  debljinu stjenke [ $\text{m}$ ],  $\lambda$  koeficijent vodljivosti materijala [ $\text{W/mK}$ ], a  $t$  vrijeme [ $\text{s}$ ]. Ako se temperature u stjenci s vremenom ne mijenjaju imamo stacionarno provođenje topline.

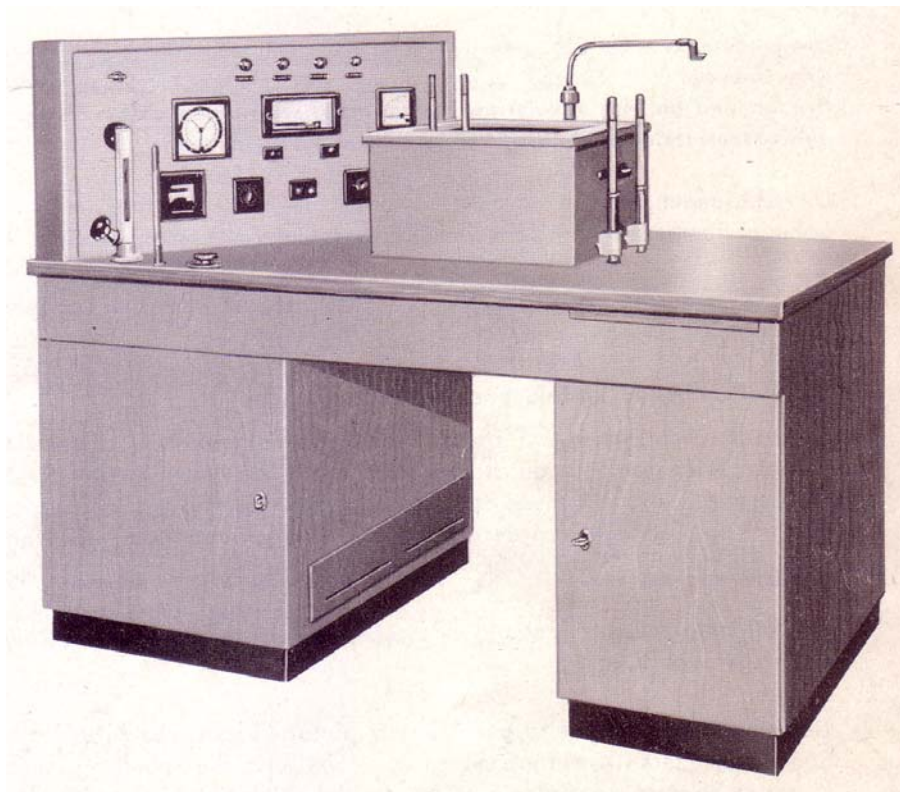
Ukoliko je za ustaljeni toplinski tok poznata gustoća toplinskog toka  $\dot{q}$  kroz stjenku, može se mjerenjem površinskih temperatura i korištenjem preuređene jednadžbe 8.1. odrediti koeficijent provođenja topline  $\lambda$ :

$$\lambda = \frac{Qd}{At(\vartheta_1 - \vartheta_2)} = \frac{\dot{Q}d}{A(\vartheta_1 - \vartheta_2)} = \frac{\dot{q}d}{(\vartheta_1 - \vartheta_2)} \quad (8.2)$$

## 9. KARAKTERISTIKE ISPITNOG UREĐAJA I UZORKA

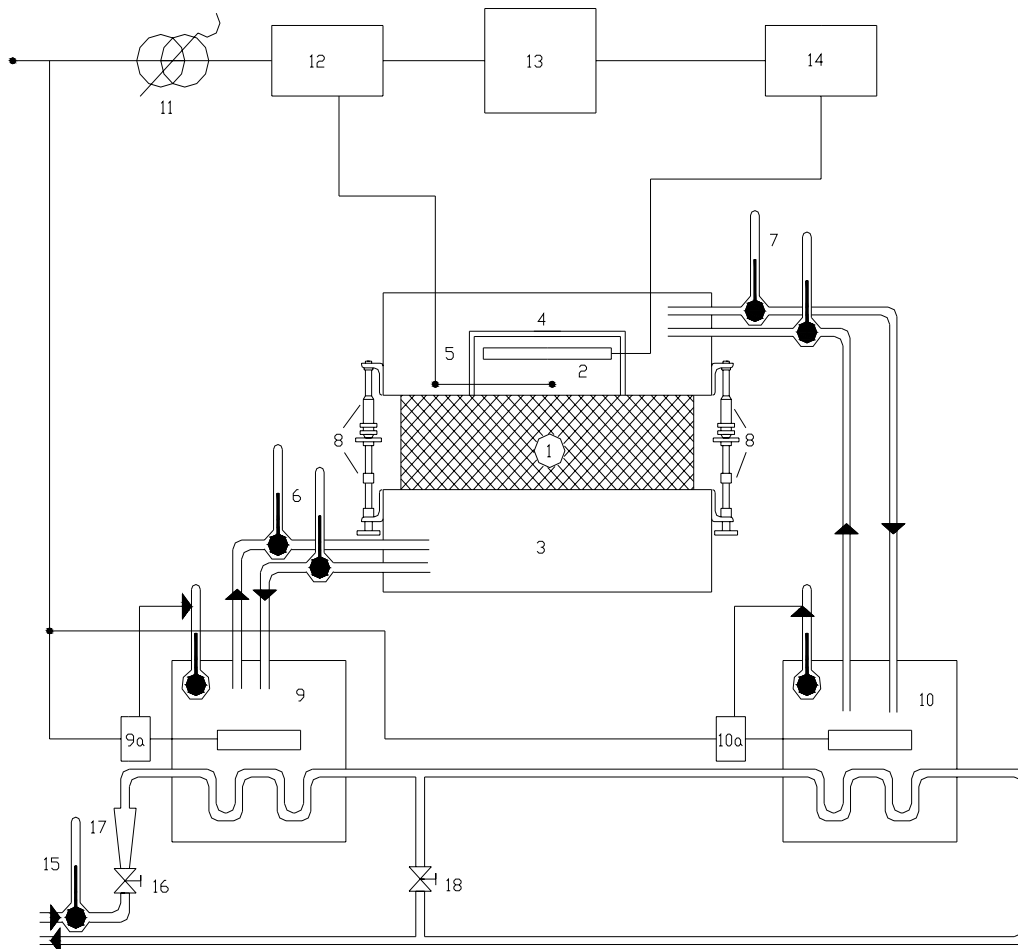
### 9.1. Osnovni podaci o uređaju

Uređaj za laboratorijsko ispitivanje koeficijenta toplinske vodljivosti izolacijskih materijala u laboratoriju za toplinska mjerenja Tehničkog fakulteta je tipa Feutron 4110, proizvod firme Karl Weiss G.m.b.H. Izrađen je u obliku ispitnog stola (slika 9.2). Ovim aparatom se ispituju građevinski i izolacijski materijali čiji se koeficijent toplinske vodljivosti kreće u granicama  $\lambda = (0,016 \div 1,98)$  [W/mK]. Ispitivati se mogu homogeni ili približno homogeni materijali, te materijali sa sitnim porama i rasuti materijal.



Sl. 9.1. Izgled uređaja FEUTRON 4110

## 9.2. Princip rada uređaja



Sl. 9.2 Uređaj FEUTRON 4110

1. Ispitni uzorak
2. Topla ploča
3. Hladna ploča
4. Zaštitna topla ploča
5. Termopipalo
6. Termometar (hladna ploča)
7. Termometar (topla ploča)
8. Vijci za mjerenje debljine
9. Termostat za hladnu ploču
- 9a. Regulator temperature za termostat hladne ploče
10. Termostat za zaštitnu ploču (toplu ploču)
- 10a. Regulator temperature za zaštitnu ploču (toplu ploču)
11. Regulacijski transformator
12. Regulator s dvije mjeme točke
13. Električno brojilo (Wh)
14. Razdjelnik napona (stupnja opterećenja) s 12 položaja
15. Termometar za rashladnu vodu
16. Ventil za rashladnu vodu
17. Mjerač protoka rashladne vode
18. By-pass ventil

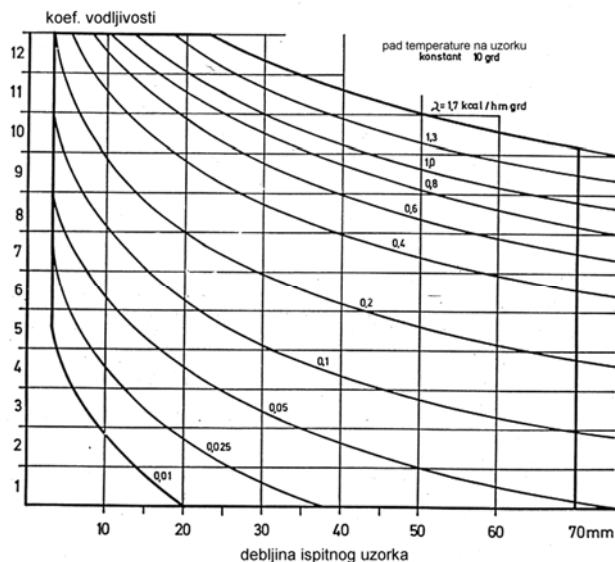
Ispitivanje se provodi prema metodi dr. Bocka. Ispitni uzorak se postavlja između dvije ravne ploče, gornje tople ploče i donje hladne ploče. Topla ploča s elektro grijačem smještena je unutar zaštitne tople ploče čija se temperatura održava konstantnom. Topla ploča se grije električnim grijačem, a hladna ploča se hladi vodom. Temperatura obiju ploča održava se konstantnom pomoću termostata 9 i 10.

Nakon stavljanja uređaja u pogon, potrebno je postići kvazistacionarno stanje, u kome je el. energija utrošena za zagrijavanje tople ploče proporcionalna protoku topline kroz ispitivani materijal. Potrebno vrijeme za postizanje kvazistacionarnog stanja uobičajeno iznosi 2 do 2,5 sata, a preciznije se može odrediti prema sljedećem izrazu:

$$z_a = \frac{1}{3600} \frac{\rho c d^2}{2 \lambda} \quad [\text{h}] \quad (9.1)$$

gdje je:  $\rho$  gustoća [ $\text{kg/m}^3$ ],  $c$  specifična toplina ispitivanog materijala [ $\text{J/kgK}$ ],  $d$  debljina ispitivanog uzorka [ $\text{m}$ ] i  $\lambda$  pretpostavljeni koeficijent toplinske vodljivosti ispitivanog materijala [ $\text{W/mK}$ ]. Za zagrijavanje termostata potrebno je još oko 0,5 sati.

Da bi razlika temperatura na površinama uzorka bila unutar prihvatljivog područja (oko  $10^\circ\text{C}$ ), čime je osigurano dobro očitavanje i najbolja točnost mjerenja, treba dovedenu toplinu u stacionarnom stanju prilagoditi na odgovarajući način. To se čini određivanjem stupnja opterećenja. Iz dijagrama na Sl. 9.3 se temeljem pretpostavljenog koeficijenta toplinske vodljivosti  $\lambda$  i poznate debljine uzorka  $d$  određuje stupanj opterećenja koji može biti u granicama od 1...12 (ordinata dijagrama).



Sl. 9.3 Dijagram stupnja opterećenja kao funkcija debljine i koeficijenta toplinske vodljivosti uzorka

U ovisnosti o stupnju opterećenja određuje se konstanta stupnja opterećenja  $K_i$ , potrebna za izračunavanje toplinske vodljivosti.

Tab. 9.1. Vrijednosti konstanti stupnja opterećenja u ovisnosti od stupnja opterećenja

Stupanj opterećenja	Konstanta stupnja opterećenja $K_i$
1	106,4
2	157,1
3	238,5
4	335,8
5	486,7
6	725,8
7	1069,0
8	1576,0
9	2284,0
10	3327,0
11	4752,0
12	6768,0

### 9.3. Osnovni podaci o uzorku

Ako je materijal za koji se ispituje toplinska vodljivost homogen ili približno homogen, ispitni uzorak je okrugla ili kvadratna ploča debljine 10 do 70 mm. Promjer kruga odnosno stranica kvadrata je 200 do 250 mm. Ako je uzorak kojeg ispituujemo od nekog rasutog materijala, za postavljanje u ispitni uređaj potreban je rubni graničnik.

### 9.4. Priprema uzorka za ispitivanje

Uzorak se prije samog ispitivanja mora osušiti. Materijali osjetljivi na visoke temperature suše se do 40 °C (npr. stiropor), a materijali koji to nisu (npr. mineralna vuna) suše se do 105°C.

Da bi se odredio postotak vlage u zraku, provodi se dvostruko vaganje uzorka. Prvo vaganje je neposredno nakon sušenja. Zatim se uzorak pusti da odstoji na sobnoj temperaturi neko vrijeme, pri čemu apsorbira određeni postotak vlage, a onda se ponovo važe.

Uzorak mora biti dobro površinski obrađen da bi dobro nalijegao između tople i hladne ploče uređaja.

Ako je materijal porozan i barem malo higroskopan, premazuje se uljem kako bi nestali zračni jastuci koji predstavljaju veliki otpor prolazu topline ( $\lambda = 0,021 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) i na taj način uvelike izmjenili rezultate mjerenja.

## 10. LABORATORIJSKA VJEŽBA IZ ODREĐIVANJA TOPLINSKE VODLJIVOSTI IZOLACIJSKIH MATERIJALA

### 10.1. Način ispitivanja

Pločasti uzorak se postavlja između tople i hladne ploče uređaja. Debljina uzorka očitava se na četiri mjesta pomoću mikrometarskih vijaka, a kao konačni podatak uzima se srednja aritmetička vrijednost dobivenih očitavanja. Nužno je da ispitni uzorak dobro naliježe na toplu i na hladnu ploču.

Temperature tople i hladne ploče održavaju se konstantnima pomoću termostata i temperaturnih regulatora.

Nakon puštanja uređaja u pogon, potrebno je postići kvazistacionarno stanje, tj. uzorak zagrijati u toj mjeri da se dobije ujednačena raspodjela temperature. Vrijeme zagrijavanja uzorka, kako se vidi iz izraza 9.1 ovisi o sljedećim parametrima:

- masi
- gustoći
- toplinskoj vodljivosti
- specifičnoj toplini

Kao što je već rečeno, uobičajeno vrijeme za postizanje kvazistacionarnog stanja je 2 do 2,5 sati, s time da je još oko 0,5 sati potrebno termostatima da dođu na radnu temperaturu.

Prilikom ispitivanja potrebno je očitati sljedeće veličine:

- temperatura vode koja se dovodi u uređaj
- temperatura zraka u prostoriji
- stanje na električnom brojilu
- temperature ne termometrima postavljenima na:
  - dovodu vode na toploj ploči ( $t_{w1}$ )
  - odvodu vode na toploj ploči ( $t_{w2}$ )
  - dovodu vode na hladnoj ploči ( $t_{k1}$ )
  - odvodu vode na hladnoj ploči ( $t_{k2}$ )

Uobičajeno je očitavanje provoditi svakih 30 minuta, ali je moguće očitavati i svakih 15 minuta.

Rezultati ispitivanja unose se u zapisnik sa predviđenim poljima za sve mjerne i izračunate vrijednosti toplinske vodljivosti koje se određuju iz očitanih temperatura uzevši u obzir debljinu ispitivanog uzorka i konstantu aparata.

Radi kontrole aparature, povremeno se vrši ispitivanje sa mjernim uzorkom poznate vodljivosti; ploča iz kremenog stakla sa  $\lambda = 0,7$  [W/m<sup>2</sup>K].

## 10.2. Proračun koeficijenta toplinske vodljivosti iz rezultata mjerenja

Koeficijent toplinske vodljivosti  $\lambda$ , izračunava se prema izrazu:

$$\lambda = \frac{qd}{\Delta\vartheta - qw} \quad (10.1)$$

gdje je:

$w$  [ $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ ] - vrijednost otpora provođenju topline samog uređaja. Za konkretan uređaj u laboratoriju Tehničkog fakulteta navedena je u priručniku vrijednost  $w = 1,10 \cdot 10^{-3}$  [ $\text{hm}^0\text{C}/\text{kcal}$ ].

$q$  [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] – gustoća toplinskog toka koja se izračunava kao:

$$q = \frac{\Delta E}{\Delta Z} K_i \quad (10.2)$$

gdje je:

$\Delta E$  – promjena stanja na električnom brojilu (utrošak električne energije) (Wh)

$\Delta Z$  – vremenski interval (h)

$K_i$  – konstanta stupnja opterećenja

Srednja debljina uzorka:

$$d = \sum \frac{d_i}{4} \quad (10.3)$$

gdje je:

$d_i$  – debljina uzorka očitana na pojedinom mikrometru (m)

$$\Delta\vartheta = \vartheta_w - \vartheta_k \quad (10.4)$$

$$\vartheta_w = \frac{\vartheta_{w1} + \vartheta_{w2}}{2} \quad (10.5)$$

$\vartheta_w$  – srednja temperatura medija (tople vode) za zaštitnu toplu ploču

$\vartheta_{w1}$  – ulazna temperatura medija za zaštitnu toplu ploču

$\vartheta_{w2}$  – izlazna temperatura medija za zaštitnu toplu ploču

Temperature  $\vartheta_{w1}$  i  $\vartheta_{w2}$  usvajaju se kao srednje vrijednosti svih mjerenja.

$$\vartheta_k = \frac{\vartheta_{k1} + \vartheta_{k2}}{2} \quad (10.6)$$

$\vartheta_k$  – srednja temperatura medija (rashladne vode) za hladnu ploču (K)

$\vartheta_{k1}$  – ulazna temperatura medija za hladnu ploču (K)

$\vartheta_{k2}$  – izlazna temperatura medija za hladnu ploču (K)

Temperature  $\vartheta_{k1}$  i  $\vartheta_{k2}$  usvajaju se kao srednje vrijednosti svih mjerenja.

### 10.3. Primjer rezultata mjerenja

Zbog podataka o konstantama uređaja i drugih podataka za proračun izraženih u tehničkom mjernom sustavu, obrada rezultata mjerenja provodi se u jedinicama tehničkog mjernog sustava, a na kraju se rezultat preračunava u jedinice SI sustava.

Tab. 9.2. Određivanje toplinske vodljivosti

ODREĐIVANJE TOPLINSKE VODLJIVOSTI MATERIJALA:					ISPITIVANJE BR.: 1 MATERIJAL: IVERICA DATUM: 18.03.2004				
Uređaj tv. Br. 570/68 FEUTRON 4110									
OČITANJE	1	2	3	4	5	6	7	8	9
VRIJEME	10:45	11:00	11:15	11:30	11:45	12:00	12:15	12:30	12:45
TEMPERATURA RASHLADNE VODE (°C)	15,25	15,25	15,25	15,25	15,25	15,25	15,25	15,25	15,25
TEMPERATURA OKOLINE (°C)	24,5	24,5	24,6	24,8	24,9	25,0	25,0	25,5	25,7
$E$	3,5249	3,5460	3,5673	3,5885	3,6096	3,6304	3,6515	3,6725	3,6937
$\vartheta_{w1}$ (°C)	30,83	30,88	30,89	30,89	30,85	30,85	30,90	30,91	30,89
$\vartheta_{w2}$ (°C)	30,89	30,91	30,90	30,90	30,86	30,86	30,91	30,91	30,90
$\vartheta_{k1}$ (°C)	23,28	23,29	23,29	23,28	23,29	23,30	23,30	23,30	23,28
$\vartheta_{k2}$ (°C)	23,40	23,38	23,39	23,38	23,38	23,39	23,40	23,41	23,41
STUPANJ OPTEREĆENJA	4	4	4	4	4	4	4	4	4
$\Delta E$	0,0211	0,0213	0,0212	0,0211	0,0208	0,0211	0,0210	0,0212	0,0212
$\Delta Z$	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
$\frac{\Delta E}{\Delta Z}$	0,0844	0,0852	0,0848	0,0844	0,0832	0,0844	0,0840	0,0848	0,0848
OČITANJA NA MJERNIM VIJCIMA	OČITANJE NA POČETKU MJERENJA	VRIJEDNOSTI NA KRAJU MJERENJA	GREŠKA	ISPRAVLJENE VRIJEDNOSTI					
				NA POČETKU MJERENJA	NA KRAJU MJERENJA				
$d_1$ (mm)	37,06	37,09	-0,17	37,23	37,26				
$d_2$ (mm)	37,05	37,02	+0,29	36,76	37,73				
$d_3$ (mm)	37,09	37,02	-0,03	37,12	37,05				
$d_4$ (mm)	37,29	37,15	+0,24	37,05	36,91				
$\sum d_i$ [mm]				148,16	147,95				
$d_e = \frac{\sum d_i}{4}$ [mm]				37,04	36,99				



Tab. 9.2. Određivanje toplinske vodljivosti - nastavak

<b>Prethodna obrada uzorka: ravno blanžano</b>		
<b>Primjenjeno kontaktno sredstvo: /</b>		
Težina ( kp)	prije ispitivanja: 1,535 poslje ispitivanja: 1,535	Spec. težina materijala: $\gamma=720$ (kp/m <sup>3</sup> ) Težina po jedinici površine: 26,7 (kp/m <sup>3</sup> )
Sređivanje očitanih vrijednosti od 2 do 9, stoga $m=8$		$q \cdot w = 28,3 \cdot 1,1 \cdot 10^{-3} = 0,03115$
$\sum_2^9 t_{w1} = 247,06; \frac{\sum_2^9 t_{w1}}{m} = \bar{t}_{w1} = 30,88$		$d = \frac{d'_e + d''_e}{2} = \frac{37,04 + 36,99}{2} = 37,02$
Greška termometra za $t_{w1} = 0,00$		Otpor prolaza topline: $w = 1,1 \cdot 10^{-3}$ [hm <sup>2</sup> C/kcal]
$\bar{t}_{w1} - greška = a = 30,88$		Konstanta brojila: $c = 1000$ [Wh/jed. brojila]
$\sum_2^9 t_{w2} = 247,15; \frac{\sum_2^9 t_{w2}}{m} = \bar{t}_{w2} = 30,89$		$\lambda = \frac{qd}{\Delta t - qw}$ [kcal/mh°C]
Greška termometra za $t_{w2} = +0,04$		$\lambda = \frac{28,3 \cdot 0,03702}{7,55 - 0,03115}$
$\bar{t}_{w2} - greška = b = 30,85$		$\lambda = 0,1395$ [kcal/mh°C]
$\sum_2^9 t_{k1} = 186,33; \frac{\sum_2^9 t_{k1}}{m} = \bar{t}_{k1} = 23,29$		$\lambda = 0,1622$ [W/mK]
Greška termometra za $t_{k1} = +0,03$		
$\bar{t}_{k1} - greška = c = 23,26$		<u>Kontrola stacionarnosti stanja:</u>
$\sum_2^9 t_{k2} = 187,14; \frac{\sum_2^9 t_{k2}}{m} = \bar{t}_{k2} = 23,29$		Stanje se može smatrati stacionarnim ako kvocijent između razlike očitavanja na el. brojilu ( $\Delta E$ ) i razlike vremena ( $\Delta Z$ ) ne varira više od 2,5% obzirom na srednju aritmetičku vrijednost. Ako se navedeno mjerenjem postiglo smatra se dovoljno točnim.
Greška termometra za $t_{k2} = +0,02$		$\frac{\sum \Delta E}{\Delta Z} = 0,0844$
$\bar{t}_{k2} - greška = e = 23,27$		$\Delta_{max} = \frac{0,0844 - 0,0832}{0,0844}$
$a + b = 30,88 + 30,85 = 61,73$		$\Delta_{max} = 0,0142 (\approx 1,42\%) < 2,5\%$
$c + e = 23,26 + 23,37 = 46,63$		
$(a + b) - (c + e) = 15,10$		
$\Delta t = \frac{(a + b) - (c + e)}{2} = 7,55$		
$t_m = \frac{a + b + c + e}{4} = 27,09$		
$\sum \Delta E = 0,1688$		
$\sum \Delta Z = 2$		
$\frac{\sum \Delta Z}{\sum \Delta E} = \frac{0,1688}{2} = 0,0844$		
Konstanta stupnja opterećenja: $K_i = 335,8$		
$q = \frac{\sum \Delta E}{\sum \Delta Z} K_i = 28,3$		