

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAĐEVINSKI FAKULTET

Maja Jaković, Ivana Slaviček

**ANALIZA TOPLINSKIH SVOJSTAVA GRAĐEVNIH MATERIJALA
PRIMJENOM METODE VRUĆEG DISKA**

Zagreb, 2010.

Ovaj rad izrađen je u laboratoriju Zavoda za materijale Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu pod vodstvom prof. dr. sc. Dunje Mikulić, dipl. ing. fizike, i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2009/2010.

1. UVOD	3
2. OSNOVNI POJMOVI ZNANOSTI O TOPLINI	4
2.1. TEMPERATURA	4
2.2. TOPLINA	5
2.3. KOLIČINA TOPLINE	6
2.4. TOPLINSKI KAPACITET	6
2.5. SPECIFIČNI TOPLINSKI KAPACITET	7
2.6. PRIJENOS TOPLINE	7
2.6.1. Prijenos topline vođenjem (kondukcijom)	8
2.6.2. Prijenos topline strujanjem (konvekcijom)	9
2.6.3. Prijenos topline zračenjem (radijacijom)	10
2.7. TOPLINSKA DIFUZIVNOST	11
2.8. EFUZIVNOST	13
3. TOPLINSKA PROVODLJIVOST GRAĐEVNIH MATERIJALA	15
3.1. TOPLINSKA PROVODLJIVOST	15
3.2. OVISNOST TOPLINSKE PROVODLJIVOSTI λ O VOLUMENSKOJ MASI MATERIJALA	15
3.3. OVISNOST TOPLINSKE PROVODLJIVOSTI λ O VLAŽNOSTI MATERIJALA	18
3.4. OVISNOST TOPLINSKE PROVODLJIVOSTI λ O TEMPERATURI MATERIJALA	19
3.5. OTPOR PRIJELAZA TOPLINE	20
4. RAZVOJ TOPLINSKIH SVOJSTAVA USLIJED HIDRATACIJE	21
4.1. HIDRATACIJA CEMENTA	21
4.2. PREDVIĐANJE TOPLINE HIDRATACIJE U BETONU KOJI OČVRŠĆAVA	23
4.3. METODE REGULACIJE TOPLINE HIDRATACIJE U BETONU	25
4.4. OVISNOST TOPLINSKE PROVODLJIVOSTI λ O HIDRATACIJI	26
5. METODE ISPITIVANJA TOPLINSKE PROVODLJIVOSTI MATERIJALA	31
5.1. MJERENJE TOPLINSKE PROVODLJIVOSTI PLOČASTIM UREĐAJEM SA ZAŠTIĆENOM VRUĆOM PLOČOM	31
5.2. MJERENJE TOPLINSKE PROVODLJIVOSTI METODOM VRUĆE ŽICE	34
5.3. MJERENJE TOPLINSKE PROVODLJIVOSTI METODOM LASERSKE IMPULSNE DIFUZIVNOSTI (Laser flash diffusivity method)	36
5.4. MJERENJE TOPLINSKE PROVODLJIVOSTI METODOM VRUĆEG DISKA (Transient Plane Source)	37
6. OPIS "MATHIS TCi" UREĐAJA I UPUTE ZA RAD	38
6.1. SOFTVER "MATHIS TCi" UREĐAJA	40
6.2. PRINCIP RADA "MATHIS TCi" UREĐAJA	46
7. ISPITIVANJE TOPLINSKIH SVOJSTAVA PRIMJENOM METODE VRUĆEG DISKA, "MATHIS TCi" UREĐAJEM	52
7.1. REZULTATI ISPITIVANJA GRAĐEVNIH MATERIJALA "MATHIS TCi" UREĐAJEM	54
7.1.1. Mramor	54
7.1.2. Granit	57
7.1.3. Beton	60
7.1.4. Opeka	63
7.1.5. Ytong	64

7.2. UTJECAJ KONTAKTNOG SREDSTVA NA ISPITIVANA SVOJSTVA MATERIJALA.....	65
7.3. KOREKCIJA KALIBRACIJSKE KRIVULJE ZA OPEKU	66
7.4. ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA GRAĐEVNIH MATERIJALA.....	72
7.5. REZULTATI ISPITIVANJA CEMENTNE PASTE "MATHIS TCi" UREĐAJEM... 75	
7.5.1. <i>Cementna pasta v/c = 0,3</i>	76
7.5.2. <i>Cementna pasta v/c = 0,4</i>	79
7.6. ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA CEMENTNE PASTE.....	82
8. ZAKLJUČAK.....	84
POPIS SLIKA:	85
POPIS TABLICA:.....	88
LITERATURA:	89
SAŽETAK.....	93
SUMMARY.....	93

1. UVOD

Mjerenje toplinskih svojstava ima široku primjenu i od velike je važnosti za kontrolu kvalitete toplinsko-izolacijskih i drugih građevnih materijala. Svojstvo toplinske provodljivosti je jedan od najvažnijih pojmova u termodinamici i znanosti o materijalima. Njezina važnost se očituje u građevinarstvu kod odabira građevnih materijala za izvedbu zgrada i proračuna toplinskog toka kroz građevne dijelove zgrada. Mjerenje toplinskih svojstava ima široku primjenu i od velike je važnosti za kontrolu kvalitete toplinsko-izolacijskih i drugih građevnih materijala. Ekološki aspekti (klimatske promjene, globalno zatopljenje i efekt staklenika) i ekonomski aspekti (manja cijena grijanja/hlađenja u kontekstu kontinuiranog povećanja cijena energenata) u zgradarstvu uvode se kroz zakonodavstvo. Upravo zbog činjenice da zgrade kao najveći potrošači energije imaju veliki energetska i ekološki utjecaj, energetska učinkovitost, održiva gradnja i mogućnost korištenja obnovljivih izvora energije danas postaju prioriteti suvremene gradnje i energetike. Svaki proizvođač toplinsko-izolacijskih materijala, ali i drugih materijala za gradnju, mjeri i iskazuje svojstvo toplinske provodljivosti u obliku "deklarirane toplinske provodljivosti" [1].

Poznato je da uslijed oslobađanja topline hidratacije u masivnim betonima, tj. kao posljedica toplinskih naprezanja, dolazi do pojave pukotina. Distribucija temperature uslijed hidratacije cementne paste u masivnim betonskim blokovima u novije se vrijeme modelira numeričkim metodama. Razvijeni kompjuterski programi uzimaju u obzir razvoj mehaničkih svojstava materijala kao funkciju stupnja hidratacije betona, a zbog nedovoljno saznanja o promjeni toplinskih svojstava cementne paste za vrijeme očvršćivanja, toplinska svojstva materijala uzimaju se s vrijednosti za očvršli beton ili kao literaturni podaci iz istraživanja pojedinih autora, a ne za stvarnu situaciju koja se pojavljuje pri gradnji.

Ispitivanje toplinskih svojstava građevnih materijala najčešće se provodi stacionarnim metodama koje su dugotrajne i zahtjevaju uzorke velikih dimenzija. Kako bi se postupak mjerenja pojednostavnio i ubrzao pristupa se usavršavanju mjernih metoda i uređaja kojima će se skratiti vrijeme ispitivanja i smanjiti troškovi, uz zadržavanje iste pouzdanosti i točnosti. Cilj ovog rada je utvrđivanje mogućnosti mjerenja toplinskih svojstava građevnih materijala dinamičkom metodom vrućeg diska, kojim će se u ovom radu ispitivati svojstva toplinske provodljivosti, efuzivnosti, difuzivnosti, toplinski kapacitet i otpor prolaska topline. Istraživati će se utjecaj kontaktnog sredstva i odabira kalibracijske krivulje na toplinska svojstva ispitivanih građevnih materijala te mogućnost ispitivanja hidratizirajuće cementne paste.

2. OSNOVNI POJMOVI ZNANOSTI O TOPLINI

2.1. TEMPERATURA

Temperatura je osnovna fizikalna veličina kojom se opisuje stupanj zagrijanosti, tj. toplinsko stanje nekog tijela. Promjenom temperature tijela mijenjaju se mnoga svojstva. Promjena nekog svojstva tijela uslijed promjene temperature može se uzeti kao osnova za mjerenje temperature. Tako se npr. kod živinog termometra, za mjerenje temperature koristi svojstvo žive da kod povišenja temperature poveća svoj obujam. Položaj žive na termometru uronjenom u vodu koja se smrzava i s njom toplinski uravnoteženom, dobio je oznaku 0. U ravnoteži termometra s kipućom vodom, živa je povećala svoj obujam, i njen novi položaj dobio je oznaku 100. Razmak između ovih dviju oznaka podijeljen je na 100 jednakih dijelova i tako je dobiven jedan stupanj Celzijev, oznaka °C. Celzijeva temperaturna skala dobivena je, tako da je ledištu vode proizvoljno propisana vrijednost temperature 0°C, a vrelištu vode 100°C. Umjesto žive, mogla se, u termometar koji radi po principu promjene obujma, ugraditi i neka druga tekućina. Lord Kelvin je na temelju teorijskog stupnja korisnosti toplinskih strojeva definirao termodinamičku temperaturu T koja ne ovisi o svojstvima termometrijskog tijela već je univerzalnog karaktera. U međunarodnom sustavu mjernih jedinica (*Système International d'Unités* (SI)) termodinamička temperatura T je prihvaćena kao osnovna fizikalna veličina. Njena jedinica je kelvin, oznaka K. Termodinamička temperaturna skala je definirana pomoću termodinamičke temperature trojne točke vode T_t ; gdje je trojna točka vode ravnoteža točaka između čvrstog, tekućeg i plinovitog stanja vode. T_t je odabrana za referentnu točku i dodijeljena joj je vrijednost 273,16 kelvina. Propisivanjem vrijednosti temperature trojne točke vode ujedno je definirana i jedinica kelvin. Iz jednadžbe:

$$T_t = 273,16K \quad (1)$$

slijedi da je:

$$K = \frac{T_t}{273,16} \quad (2)$$

Ili riječima: jedinica termodinamičke temperature kelvin je 273,16-ti dio termodinamičke temperature trojne točke kemijski čiste vode.

Celzijeva temperatura t može se prikazati izrazom:

$$t = T - T_0 \quad (3)$$

Gdje je:

$T_0 = 273,15K$ - vrijednost termodinamičke temperature ledišta vode.

Time je utvrđena veza između Celzijeve i termodinamičke temperaturne skale.

Razlika od jednog stupnja Celzija jednaka je razlici od jednog Kelvina:

$$^{\circ}C = K \tag{4}$$

Celzijeva temperatura iskazuje temperaturu u odnosu na ledište vode i predstavlja interval termodinamičke temperature.

Prema kinetičko molekularnoj teoriji temperatura tijela je proporcionalna kinetičkoj energiji nesređenog gibanja njegovih molekula. Povećati temperaturu tijela znači povećati srednju brzinu kretanja njegovih molekula. Kako brzina kretanja molekula može biti sve veća, to znači da ne postoji gornja granica temperature. Naprotiv, ako zamislimo sve sporije kretanje molekula, u nekom trenutku molekule će doći u stanje mirovanja. Drugim riječima, u području niskih temperatura postoji jedna krajnja temperaturna točka koja je nazvana apsolutna nula, a nalazi se na $t = -273,15^{\circ}C$ odnosno $T = 0K$ [2, 3].

2.2. TOPLINA

Toplina je jedan od oblika energije. Toplinska energija je energija koja se provodi iz sustava više temperature u sustav niže temperature do uspostavljanja toplinske ravnoteže. Toplina i pojave koje ju prate mogu se objasniti kinetičko-molekularnom teorijom pomoću kretanja molekula. Kinetičko-molekularna teorija proizlazi iz činjenice da se sva materija koja nas okružuje, bez obzira da li je u čvrstom, tekućem ili plinovitom stanju, sastoji od molekula koje su u neprekidnom, nesređenom gibanju. Kod čvrstih tijela molekule međusobno nezavisno vibriraju oko nekog položaja ravnoteže. U tekućinama i plinovima molekule se kreću u raznim pravcima, međusobno se sudaraju i pri tome mijenjaju smjerove gibanja i brzinu gibanja, odnosno svoju kinetičku energiju. Toplinska energija zbog postojanja razlike u temperaturi, prelazi s jednog tijela na drugo dok im se temperature ne izjednače, nakon čega je količina topline koja prelazi s jednog tijela na drugo jednaka nuli. Toplina nekog tijela jednaka je zbroju kinetičkih energija nesređenog gibanja svih njegovih molekula [2, 3].

2.3. KOLIČINA TOPLINE

Da bi se povećala temperatura nekog tijela potrebno je tom tijelu dovesti određenu količinu topline. Fizikalna veličina količina topline Q , označava toplinsku energiju koja prelazi s jednog tijela na drugo. Jedinica za količinu topline, u međunarodnom sustavu mjernih jedinica (*Système International d'Unités* (SI)), je Joule [J].

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad [\text{J}]. \quad (5)$$

Gdje je:

- m [kg] - masa tijela,
- c [J/(kgK)] - specifični toplinski kapacitet,
- ΔT [°C] - promjena temperature [3, 4].

2.4. TOPLINSKI KAPACITET

Toplinski kapacitet C_p [kJ/K] je količina topline Q koju tijelo treba primiti da bi mu se temperatura povećala za $\Delta T = 1$ °C te pokazuje sposobnost tijela za akumuliranje topline. Definira se kao omjer količine topline Q [J] i promjene temperature ΔT [K]:

$$C_p = \frac{Q}{\Delta T} \quad [\text{J/K}]. \quad (6)$$

Toplinski kapacitet proporcionalan je masi tijela. Koliko se puta poveća masa tijela, toliko se puta poveća i toplinski kapacitet tijela [3, 4].

2.5. SPECIFIČNI TOPLINSKI KAPACITET

Mnogobrojnim pokusima je dokazano da između količine topline Q dovedene nekom tijelu, mase tijela m i porasta njegove temperature ΔT , postoji linearna veza:

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta T \quad (7)$$

Faktor proporcionalnosti u jednadžbi (7) je veličina:

$$c = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} \quad (8)$$

koja se zove specifični toplinski kapacitet.

Specifični toplinski kapacitet je količina topline potrebna da se jediničnoj masi nekog tijela povisi temperatura za jedinicu. Mjerna jedinica za specifični toplinski kapacitet, u međunarodnom sustavu mjernih jedinica (*Système International d'Unités* (SI)), je J/(kgK) [4]. Specifični toplinski kapacitet se također može definirati kao omjer toplinskog kapaciteta tijela C_p [J/K] i njegove mase m [kg], kako bi se mogla odrediti karakteristična vrijednost za određeni materijal, koja ne bi ovisila o masi tijela:

$$c = \frac{C_p}{m} = \frac{1}{m} \cdot \frac{Q}{\Delta T} \quad [\text{J/kgK}]. \quad (9)$$

Vrijednost veličine c se mijenja od tvari do tvari, a ovisna je o temperaturi pri kojoj je izmjerena. Zato se u građevinskoj praksi koristi njena srednja vrijednost koja približno vrijedi za određeni temperaturni interval [2, 3, 4].

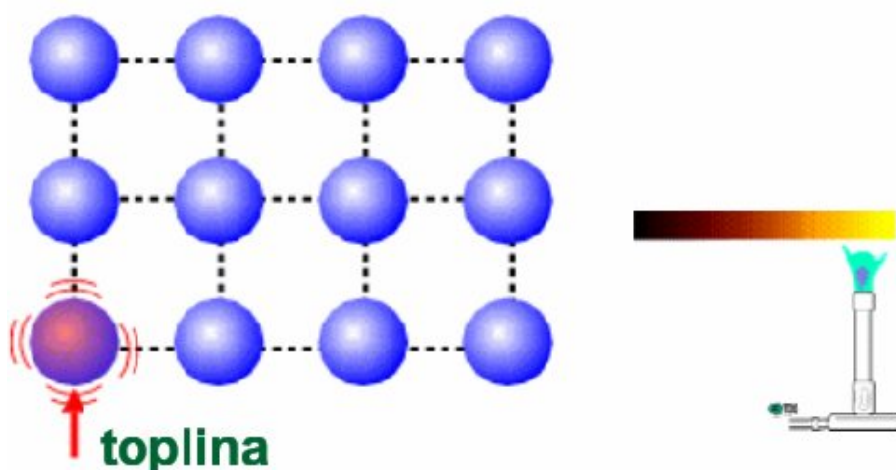
2.6. PRIJENOS TOPLINE

Prenošenje topline je prirodni proces do kojeg dolazi čim postoji razlika temperatura u nekom sustavu, ili između dva sustava, bez obzira na prirodu sredine (materija ili vakuum) koja ih odjeljuje. Kod toga se prenošenje topline vrši u smjeru niže temperature. Toplina se može prenositi na tri načina koja se razlikuju po fizikalnom obliku. To su vođenje (kondukcija),

prijelaz strujanjem (konvekcija) i prijelaz zračenjem (radijacija). Vođenjem se toplina može prenositi u čvrstim, tekućim i plinovitim sredinama, dok je prenošenje topline strujanjem moguće samo u tekućim i plinovitim sredinama, a zračenjem u plinovitim sredinama i vakuumu [2, 3, 4].

2.6.1. Prijenos topline vođenjem (kondukcijom)

Prijelaz topline vođenjem važan je za prenošenje topline kroz građevinske materijale. Kod vođenja se prijenos topline ostvaruje molekularnim gibanjem. Do prenošenja topline vođenjem dolazi uslijed prirodne težnje za homogenom razdiobom srednje brzine molekula, a time i temperature u svim dijelovima promatranog sistema. Brže molekule toplijeg dijela sistema se sudaraju s polaganijim molekulama hladnijeg dijela sistema. Kod toga se prve molekule usporavaju a druge ubrzavaju, tako da se srednje brzine molekula u čitavom sustavu izjednačavaju. Prijenos topline vođenjem shematski je prikazan na slici 1 [2].



Slika 1. Prijenos topline vođenjem

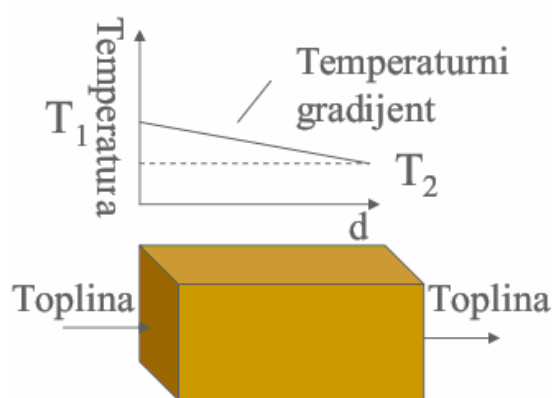
Vođenje topline kroz plinove može se shvatiti pomoću kinetičke teorije topline, odnosno zbog kaotičnog gibanja i stalnog sudara molekula, brže molekule predaju dio svoje kinetičke energije susjednim sporijim molekulama, one pak svojim susjedima i tako se energija prenosi kroz plin iz područja više temperature u područje niže temperature. Drugim riječima, prema kinetičko-molekularnoj teoriji, temperatura tijela je proporcionalna kinetičkoj energiji nesređenog gibanja njegovih molekula. U tekućinama se toplinska energija prenosi djelovanjem elastičnih titranja molekula, a za vođenje topline kroz metale važni su slobodni elektroni u njihovoj strukturi. Ako se zamisli element duljine d [m], poprečnog presjeka A ,

omeđenu paralelnim ravninama na kojima djeluju temperature T_1 i T_2 , (slika 2) količina topline Q [J], koja će u vremenu t [s] proći kroz promatrani materijal, prema Fourierovom zakonu, bit će:

$$Q = \lambda \cdot A \cdot \frac{T_1 - T_2}{d} \cdot t [\text{J}]. \quad (10)$$

Gdje je:

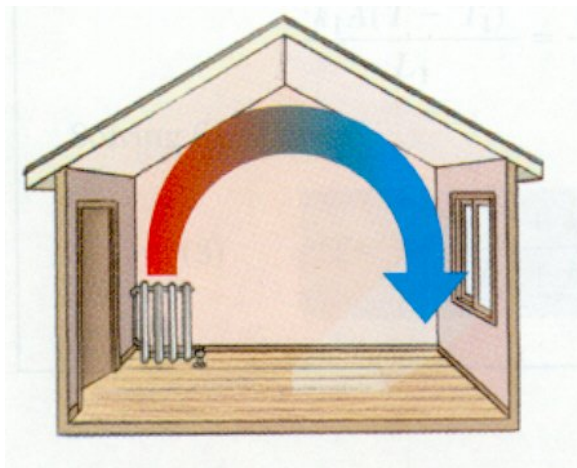
- λ [W/mK] - toplinska provodljivost [2].



Slika 2. Element duljine d , poprečnog presjeka A omeđena paralelnim ravninama na kojima djeluju temperature T_1 i T_2 [5]

2.6.2. Prijenos topline strujanjem (konvekcijom)

Za širenje topline konvekcijom potrebna je struja nekog fluida (plina ili tekućine) pri čemu fluid prima toplinu na jednom mjestu i odnosi je svojom strujom na neko drugo mjesto, gdje je predaje nekom hladnijem čvrstom tijelu ili se miješa s hladnijim dijelom fluida i njemu predaje toplinu. Ovakva struja fluida naziva se struja konvekcije. Postoji prirodna konvekcija koja je prouzrokovana gibanjem dijela fluida zbog razlika u gustoći nastalih nejednolikom temperaturom, te prisilna konvekcija koja nastaje kad je struja fluida prouzrokovana nekim mehaničkim uređajem, pumpom ili ventilatorom. Primjer prijenosa topline konvekcijom je zagrijavanje prostorija pri čemu se toplina s radijatora prenosi po cijeloj sobi. Zagrijani zrak iznad radijatora diže se uvis, a hladan zrak dolazi do radijatora odozdo te se strujanjem zraka toplina raznosi po sobi. Prijenos topline strujanjem prikazano je na slici 3 [2].



Slika 3. Prijenos topline strujanjem

Prijenos topline strujanjem računa se prema izrazu:

$$q = h_c \cdot (T_p - T_f) \quad [\text{W}]. \quad (11)$$

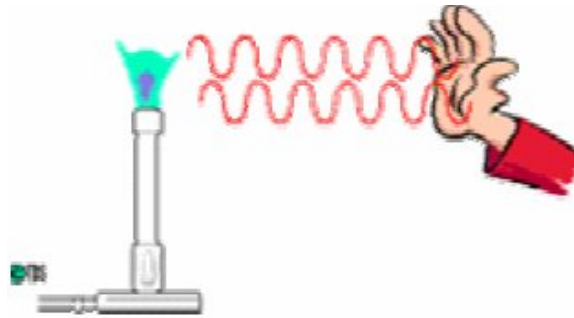
Gdje je:

- q [W/m^2] - gustoća toplinskog toka koja s površine promatranog elementa pređe konvekcijom na zrak ,
- T_p [K] - temperatura čvrste plohe uz koju struju fluid,
- T_f [K] - temperatura fluida dalje od granične plohe,
- h_c [$\text{W}/\text{m}^2 \text{ K}$] - koeficijent konvekcije koji ovisi o nizu parametara, npr. o razlici temperature, geometriji, obliku i položaju plohe, brzini i načinu strujanja topline, tlaku itd.

2.6.3. Prijenos topline zračenjem (radijacijom)

Radijacija ili zračenje je prijenos topline pomoću elektromagnetskih zraka. Sva tijela, u čvrstom i tekućem stanju, odaju dio kinetičke energije svojih molekula u obliku energije elektromagnetskih valova koju zrače svojom površinom. Vrijedi i obrnuto, kada elektromagnetski valovi dopiju do površine nekog tijela, jedan njihov dio tijelo apsorbira i pretvara ga u kinetičku energiju svojih molekula, a to znači toplinu. Ukupna energija prenesena zračenjem dobije se kao razlika između energije što je emitira površina nekog tijela i energija koju je ta površina pri dozračivanju apsorbirala. Omjer apsorbiranog i upadnog

zračenja zove se faktor apsorpcije, a omjer reflektiranog i upadnog zračenja faktor refleksije. Prijenos topline zračenjem simbolično prikazuje slika 4.



Slika 4. Prijenos topline zračenjem

Razmjena topline ovisi o svojstvima tijela, njihovom međusobnom položaju i površini pojedinog tijela. Prijenos topline zračenjem dobije se kao razlika između energije što ju neko tijelo emitira i energije koju je isto tijelo pri dozračivanju apsorbiralo:

$$q = h_r \cdot (T_1 - T_2) \quad [\text{W}]. \quad (12)$$

Gdje je:

- q [W] - gustoća toplinskog toka koja se prenosi zračenjem,
- h_r [W/m²K] - koeficijent prijenosa topline zračenjem od jedne plohe temperature T_1 [K] prema drugoj plohi temperature T_2 [K] [2].

2.7. TOPLINSKA DIFUZIVNOST

Toplinska difuzivnost je mjera prijenosa topline s jedne strane materijala na drugu. To je omjer sposobnosti toplinske izolacije i sposobnosti očuvanja topline. Oznaka za toplinsku difuzivnost je α , a mjerna jedinica [m²/s]. Određuje se prema izrazu:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad [\text{m}^2/\text{s}]. \quad (13)$$

Gdje je:

- λ [W/mK] - toplinska provodljivost,
- ρ [kg/m³] - gustoća materijala,
- c_p [J/kgK] - specifični toplinski kapacitet.

Iz manjih vrijednosti za α slijedi sporije širenje topline u nekom materijalu. Za vremensko zadržavanje jednog takvog temperaturnog prolaza pogodni su materijali s nižom toplinskom difuzivnošću, ali s istovremeno većom gustoćom. Osnovne vrijednosti za koeficijent toplinskog provođenja raznih građevnih materijala dane su u tablici 1 [6].

Tablica 1. Osnovne vrijednosti za toplinsku difuzivnost raznih građevinskih materijala [6]

Građevni materijal	Toplinska difuzivnost α [10^6 m ² /s]
<i>Beton</i>	1
<i>Staklo</i>	0,9
<i>Drvo</i>	0,15
<i>Izolacijske ploče od drvenih vlakana</i>	0,2
<i>Opeka</i>	0,6
<i>Mineralna vuna (staklena vuna, kamena vuna)</i>	0,8
<i>EPS, XPS</i>	1,2
<i>Beton s porama</i>	0,4
<i>Čelik</i>	14
<i>Puna cigla</i>	0,4
<i>Celulozna vlakna</i>	0,5

2.8. EFUZIVNOST

Efuzivnost je svojstvo prodiranja topline u materijal i prijenosa topline prisutno u svim materijalima kao i u svim oblicima (krutine, tekućine, paste, prahovi i plinovi). Kao i koeficijent toplinske difuzivnosti α , tako i efuzivnost služi za ocjenu toplinsko tehničkog ponašanja materijala pod nestacionarnim temperaturnim graničnim uvjetima. Oznaka za efuzivnost je e , a mjerna jedinica [$\text{W}\sqrt{\text{s}}/\text{m}^2\text{K}$]. Određuje se prema izrazu:

$$e = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c_p} \quad [\text{W}\sqrt{\text{s}}/\text{m}^2\text{K}]. \quad (14)$$

Gdje je:

- λ [W/mK] - toplinska provodljivost materijala,
- ρ [kg/m^3] - gustoća materijala,
- c_p [J/kgK] - specifični toplinski kapacitet.

Vrijednosti efuzivnosti za osnovne građevinske materijale mogu se vidjeti u tablici 2. Ukoliko je veća efuzivnost nekog materijala onda se toplina može brže preuzeti s površine i odvoditi u materijal. To je važno za spremanje topline unutar materijala. Materijali s velikom efuzivnosti su hladni pri dodiru, dok se oni s malom efuzivnosti mogu(i pri materijalno tehničkim prednostima) koristiti kao dobar podni površinski materijal pri čemu se površina zbog slabog toplinskog provođenja brzo zagrije [6].

Tablica 2. Osnovne vrijednosti za efuzivnost raznih građevinskih materijala [6]

Građevni materijal	Efuzivnost e [$\text{W}\sqrt{\text{s}/\text{m}^2\text{K}}$]
<i>Beton</i>	2300
<i>Staklo</i>	1500
<i>Drvo</i>	300
<i>Izolacijske ploče od drvenih vlakana</i>	100
<i>Opeka</i>	1100
<i>Mineralna vuna(staklena vuna, kamena vuna)</i>	35
<i>EPS, XPS</i>	35
<i>Beton s porama</i>	250
<i>Čelik</i>	13000
<i>Puna cigla</i>	1100
<i>Celulozna vlakna</i>	50

3. TOPLINSKA PROVODLJIVOST GRAĐEVNIH MATERIJALA

3.1. TOPLINSKA PROVODLJIVOST

Toplinska provodljivost je svojstvo građevnih materijala da provode toplinu. Toplinska provodljivost nekog materijala λ , definiše se kao količina topline koja u jedinici vremena prođe kroz sloj materijala površine presjeka 1 m^2 i debljine 1 m okomito na njegovu površinu pri razlici temperature 1 K :

$$\lambda = \frac{Q}{A \cdot \Delta T} \cdot \frac{d}{t} \quad [\text{W/mK}]. \quad (15)$$

Gdje je:

- Q [J] - količina topline,
- A [m^2] površina,
- ΔT [K] razlika temperature,
- d [m] debljina materijala,
- t [s] vrijeme prolaza topline.

Materijali s malom vrijednošću λ zovu se toplinski izolatori, a oni s velikom vrijednošću toplinske provodljivosti nazivaju se vodiči topline.

Vrijednost toplinske provodljivosti λ vrlo je promjenjiva, čak i kod jednog te istog materijala. Ona ovisi o gustoći, odnosno poroznosti, kemijskom sastavu materijala, sadržaju vlage u materijalu i o njegovoj temperaturi. Zato govoriti o vrijednosti toplinske provodljivosti λ nekog materijala ima smisla samo ako se preciziraju svi ovi faktori [4].

3.2. OVISNOST TOPLINSKE PROVODLJIVOSTI λ O VOLUMENSKOJ MASI MATERIJALA

Volumenska masa ρ je omjer mase m [kg] neke tvari i volumena te tvari, s porama i šupljinama V [m^3]:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad [\text{kg/m}^3]. \quad (16)$$

Volumenska masa građevnih materijala kreće se u vrlo velikom rasponu: od 20 kg/m³ za ekspanzirani polistiren, do 2800 kg/m³ za granit, odnosno čak 7800 kg/m³ za građevinski čelik [7].

Povećanjem volumenske mase povećava se i vrijednost toplinske provodljivosti λ , i obrnuto, smanjenjem volumenske mase smanjuje se i vrijednost veličine λ . Poznavajući volumensku masu građevinskog materijala može se procijeniti približna vrijednost toplinske provodljivosti λ . Promjena toplinske provodljivosti λ građevnih materijala, s promjenom njihove volumenske mase, proizlazi iz činjenice da svaki građevni materijal sadrži i mnoštvo pora i šupljina ispunjenih zrakom. Vrijednost toplinske provodljivosti λ apsolutno gustog materijala bez pora, ovisi o kemijskom sastavu tvari i uvijek je veća od oko 0,3 W/(mK). Vrijednost veličine λ za zrak sadržan u porama materijala znatno je manja i iznosi oko 0,023 W/(mK). Zato će vrijednost toplinske provodljivosti λ građevinskog materijala biti jednaka srednjoj vrijednosti između one za apsolutno gusti materijal i vrijednosti za zrak sadržan u porama, jer je vrijednost toplinske provodljivosti manja što je manja volumenska masa materijala, odnosno što u njegovoj strukturi ima više pora.

Ne postoji jedinstveni matematički zakon koji bi povezivao veličine λ i ρ svih građevnih materijala, jer na vrijednost toplinske provodljivosti λ utječu još i dimenzije pora i struktura materijala. Kod jednake poroznosti, vrijednost veličine λ će biti veća što su pore u materijalu veće, jer se s povećanjem dimenzija pora povećava i vrijednost λ zraka zatvorenog u porama. Također je važno i da li su pore zatvorene ili međusobno povezane (otvorene). Kod otvorenih pora dolazi do većeg utjecaja prijenosa topline konvekcijom, što rezultira povećanju vrijednosti λ .

Na vrijednost toplinske provodljivosti λ nekog materijala, kako je već ranije navedeno, utječe i vrijednost λ apsolutno gustog materijala bez pora, osnovne čvrste tvari. Zato materijali različitog kemijskog sastava, a jednake volumenske mase, poroznosti i strukture, imaju različite vrijednosti toplinske provodljivosti λ .

Iz navedenog slijedi da se međusobna ovisnost veličina λ i ρ može dati samo za pojedine tipove materijala. Navođenje vrijednosti koeficijenta λ ima smisla samo ako je navedena i volumenska masa ρ tog materijala. Zato se u svim tablicama uz vrijednost veličine λ daje i vrijednost veličine ρ , kako bi se mogao izvršiti pravilan izbor toplinske provodljivosti λ .

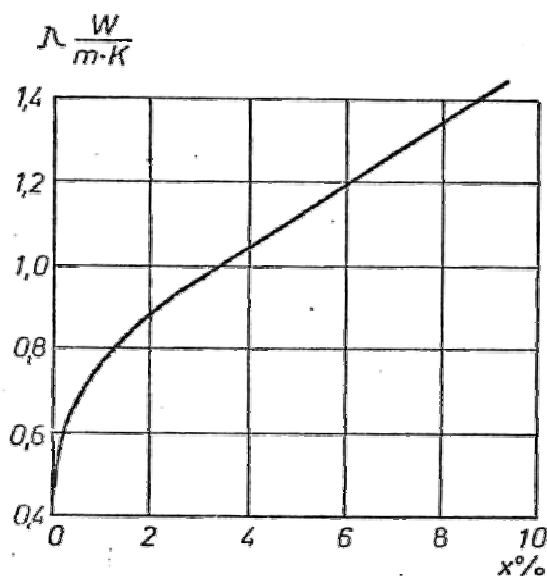
Karakteristične vrijednosti toplinske provodljivosti λ za razne građevinske materijale prikazani su u tablici 3 [8].

Tablica 3. Karakteristične vrijednosti toplinske provodljivosti [8]

Materijal	Volumenska masa [kg/m ³]	Toplinska provodljivost λ [W/mK]
<i>Olovo</i>	11500	35
<i>Čelik</i>	7860	58
<i>Granit</i>	2670	3,5
<i>Beton</i>	2400 – 1000	2 – 0,35
<i>Opeka</i>	1800 – 1300	0,8 – 0,55
<i>Asfalt</i>	2100	0,7
<i>Drvo</i>	800 – 500	0,2 – 0,14
<i>Mineralna vuna</i>	100	0,04

3.3. OVISNOST TOPLINSKE PROVODLJIVOSTI λ O VLAŽNOSTI MATERIJALA

S povećanjem vlažnosti materijala naglo raste vrijednost toplinske provodljivosti λ [2]. Na slici 5 prikazana je ovisnost koeficijenta toplinske provodljivosti zida od opeke o vlažnosti opeke.



Slika 5. Ovisnost toplinske provodljivosti zida od opeke o vlažnosti opeke [2]

Povećanje toplinske provodljivosti λ materijala s povećanjem njegove vlažnosti rezultat je činjenice da voda, koja se umjesto zraka nalazi u porama vlažnog materijala, ima vrijednost toplinske provodljivosti $\lambda=0,57$ W/(mK), što je oko 20 puta veća vrijednost od vrijednosti λ zraka. Veći porast vrijednosti koeficijenta λ kod manje vlažnosti objašnjava se time, što se kod vlaženja materijala najprije ispune vodom manje pore i kapilare, čiji je utjecaj na toplinsku provodljivost materijala veći, nego kod krupnijih pora.

Toplinska provodljivost λ još više poraste u slučaju smrzavanja vode u materijalu, jer je vrijednost toplinske provodljivosti leda oko 2,3 W/(mK), što je oko 4 puta veća vrijednost od vrijednosti veličine λ za vodu. Zbog velikog utjecaja sadržaja vlage u materijalu na vrijednost toplinske provodljivosti λ svi toplinski proračuni postaju nemogući ako nije poznata vlažnost materijala. Sadržaj vlage u materijalu može se karakterizirati ukupnom vlažnošću materijala W (% mase ili volumena) koja predstavlja odnos mase slobodne vode u materijalu i mase suhog materijala:

$$W = \frac{m_w - m_d}{m_d} \cdot 100\% \quad (17)$$

Gdje je:

- m_w [kg] - masa vlažnog materijala,
- m_d [kg] - masa suhog materijala.

Toplinska provodljivost λ određuje se pomoću relativno složenih indirektnih laboratorijskih mjerenja na prethodno osušenim uzorcima. Na taj način je isključen utjecaj vlažnosti na dobiveni rezultat. Međutim, u građevnim dijelovima zgrade materijali uvijek sadrže u sebi određenu količinu vlage koja povećava njihovu toplinsku provodljivost. Zato vrijednosti toplinske provodljivosti λ dobivene mjerenjem na suhim uzorcima treba povećati kako bi odgovarale statističkom sadržaju vlage u izvedenim građevnim elementima kod kojih je uspostavljena ravnotežna vlaga. Korekcije vrijednosti toplinske provodljivosti materijala mogu se provoditi prema postupku opisanom u normi HRN EN ISO 10456:2008 [9].

Zbog velikog utjecaja vlažnosti materijala na vrijednost toplinske provodljivosti λ potrebno je, na odgovarajući način, tehničkim mjerama zaštite spriječiti prekomjerno povećanje vlage u materijalima građevnih elemenata kod eksploatacije građevnih objekata.

3.4. OVISNOST TOPLINSKE PROVODLJIVOSTI λ O TEMPERATURI MATERIJALA

Vrijednost toplinske provodljivosti λ nekog materijala raste s porastom njegove srednje temperature, do toga dolazi zbog povećanja toplinske provodljivosti osnovne čvrste tvari koja raste zbog porasta kinetičke energije molekula. S povećanjem temperature raste i toplinska provodljivost zraka u porama materijala, a također i prenošenje topline zračenjem u porama. U građevinskoj praksi, ovisnost toplinske provodljivosti λ o temperaturi nema većeg praktičnog značenja, jer je promjena temperatura građevnih dijelova zgrade malog raspona. Zato se za toplinske proračune u građevinarstvu koriste vrijednosti λ izmjerene kod srednje vrijednosti temperature materijala od +10°C.

3.5. OTPOR PRIJELAZA TOPLINE

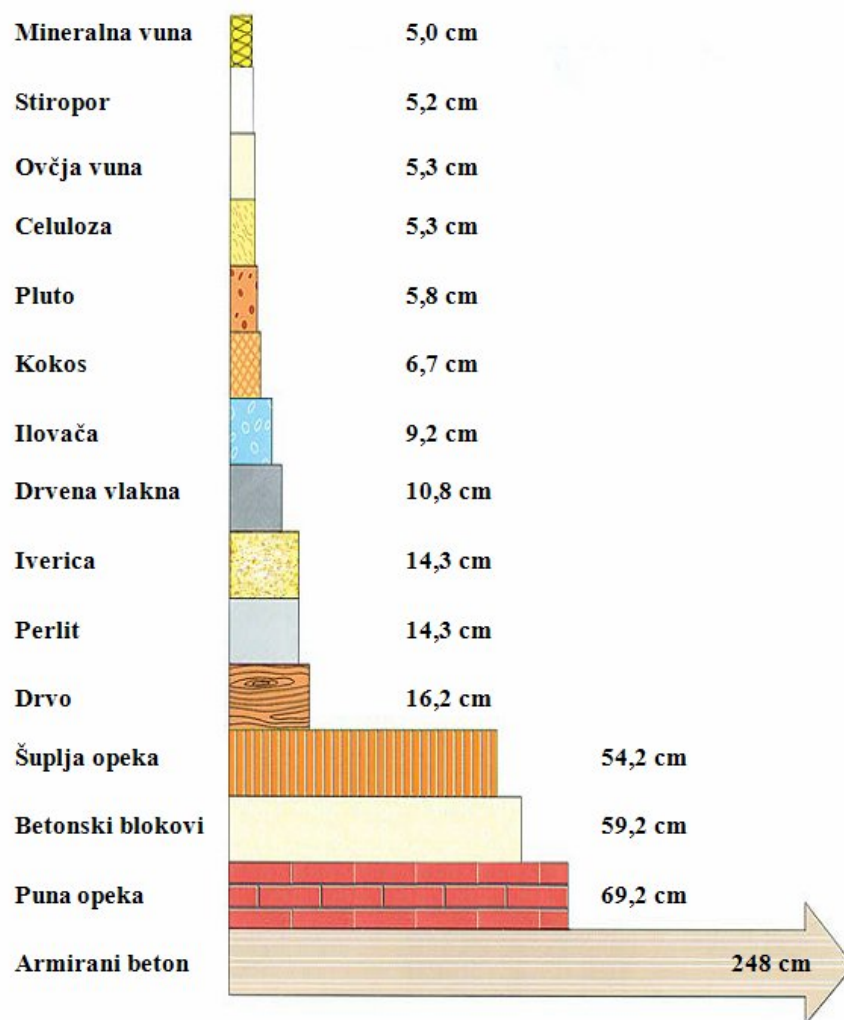
Otpor prolaska topline određuje se prema izrazu:

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad [\text{m}^2\text{K/W}]. \quad (18)$$

Gdje je:

- d [m] - debljina materijala,
- λ [W/mK] - toplinska provodljivost materijala.

Što je toplinski otpor materijala veći, materijal će biti bolji toplinski izolator, slika 6.

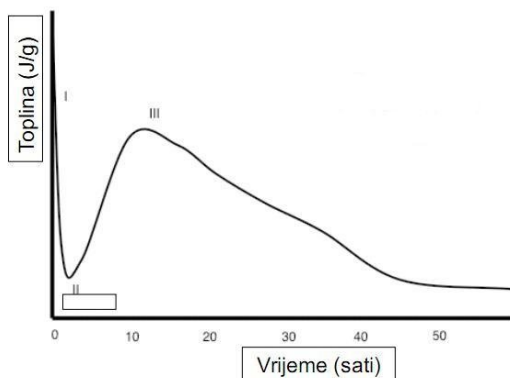


Slika 6. Potrebna debljina građevnih materijala za postizanje toplinskog otpora od $1,25 \text{ m}^2\text{K/W}$ [8]

4. RAZVOJ TOPLINSKIH SVOJSTAVA USLIJED HIDRATACIJE

4.1. HIDRATACIJA CEMENTA

Prilikom miješanja cementa i vode, započinje proces hidratacije u kojem molekule vode obavijaju ione čvrstih čestica cementa i omogućuju njihovo sređivanje u novonastale gel i kristalne strukture. Silikati i aluminati pri tome formiraju produkte hidratacije (hidrate), a zamiješana cementna pasta postepeno prelazi u očvrsnulu hidratiziranu cementnu pastu. Produkti hidratacije (kalcij silikat hidrati) nazivaju se C-S-H gel (tobermoritni gel, cementna pasta). Hidratacija je egzoterman proces kod kojeg dolazi do oslobađanja topline, ta toplina se naziva toplina hidratacije. Razvoj topline hidratacije u vremenu prikazan je na slici 7. Ovisno o kemijskom sastavu cementa, oslobađa se toplina do 500J/g kako je prikazano u tablici 4.



Slika 7. Prikaz razvoja topline kroz vrijeme [10, 11, 12]

Tablica 4. Toplina hidratacije ovisno o mineralnom sastavu cementa

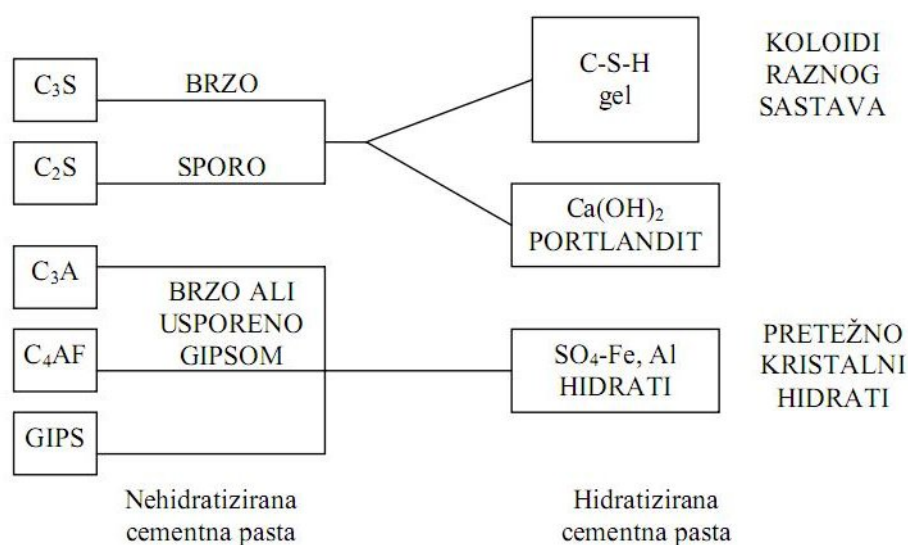
Mineralni sastojak	Toplina hidratacije (J/g)
C_3S	502
C_2S	260
C_3A	867
C_4AF	419

Osnovne reakcije pri hidrataciji, slika 8:

- $2C_3S + 6H \rightarrow C_3S_2H_3 + 3CH + 502 \text{ J/g}$
- $2C_2S + 4H \rightarrow C_3S_2H_3 + CH + 260 \text{ J/g}$
- $C_3A + CSH_2 + 26H \rightarrow \text{Etringit} + 867 \text{ J/g}$

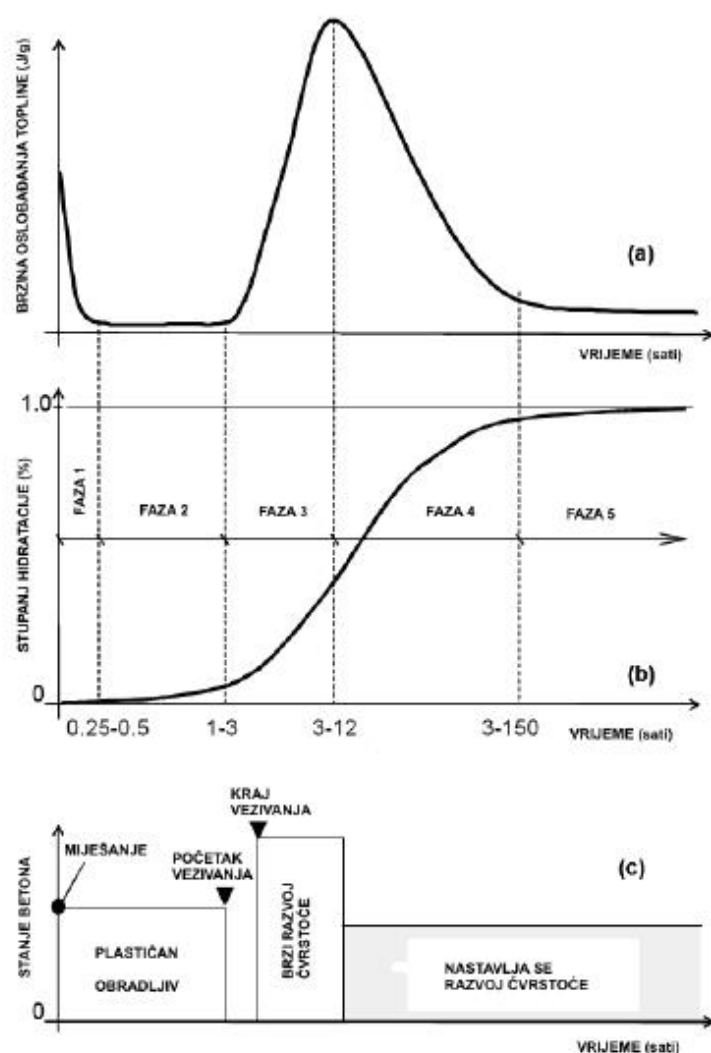
Gdje je:

- $C_3S_2H_3 = \text{C-S-H gel}$
- $H = H_2O$
- $CH = Ca(OH)_2 \rightarrow (\text{portlandit})$
- $CSH_2 = CaSO_4 \times 2H_2O \rightarrow (\text{gips})$



Slika 8. Shematski prikaz hidratacije cementa [11, 12]

Toplina hidratacije je ukupan zbroj toplina hidratacije osnovnih mineralnih sastojaka. Neovisno o tome promatra li se hidratacija cementne paste, hidratacija cementa u mortu ili hidratacija u betonu, ciklus oslobađanja topline moguće je podijeliti u više faza. Slika 9 prikazuje faze u procesu hidratacije portland-cementa u betonu i stupanj hidratacije, te promjene svojstava betona u ovisnosti o fazi hidratacije [13].



Slika 9. Faze hidratacije [11, 13]

4.2. PREDVIĐANJE TOPLINE HIDRATACIJE U BETONU KOJI OČVRŠĆAVA

Pukotine u strukturi masivnih betona uzrokovane razvojem topline zbog hidratacije cementa su dobro poznata pojava još s početka prošlog stoljeća. Metode izbjegavanja ovih pukotina uglavnom su razvijane prvenstveno za velike betonske brane i druge masivne hidrotehničke građevine. Među prvim metodama za predviđanje topline hidratacije u očvršćavajućem betonu bile su grafičke metode za predviđanje maksimalne temperature, njihova točnost se pretpostavlja na $\pm 5^{\circ}\text{C}$.

U 30-tim godinama prošlog stoljeća, primjenjuju se analitičke metode za određivanje temperaturnog područja, koje se temelje na diferencijalnoj Fourierovoj jednadžbi:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \cdot \left[\frac{(\partial^2 T)}{(\partial x^2)} + \frac{(\partial^2 T)}{(\partial y^2)} + \frac{(\partial^2 T)}{(\partial z^2)} \right] + Q(t, x, y, z) \quad (19)$$

Gdje je:

- α (m²/s) - koeficijent toplinske difuzivnosti betona,
- T (°C) – temperatura,
- x, y, z - koordinate promatrane točke ,
- $Q(t, x, y, z)$ - generirana toplina zbog hidratacije cementa u vremenu.

Krivulja razvoja topline je opisivana kao eksponencijalna krivulja oblika:

$$Q(t) = Q_{\infty} \cdot (1 - \exp(-r \cdot t)) \quad (20)$$

Gdje je:

- $Q(t)$ - toplina hidratacije oslobođena u trenutku t ,
- Q_{∞} - oslobođena toplina kada je hidratacija gotovo završena,
- r - empirijska konstanta.

Kasnije je korištena krivulja:

$$Q(t) = Q_{\infty} \cdot \exp\left(-(\tau / t)^{\beta}\right) \quad (21)$$

Gdje je:

- $Q(t)$ - toplina hidratacije oslobođena u trenutku t ,
- Q_{∞} - oslobođena toplina kada je hidratacija gotovo završena,
- τ, β – empirijske konstante.

Smatralo se da na krivulju oslobađanja topline $Q(t)$ utječe stvarna toplina koja se oslobađa u procesu očvršćivanja betona, ali ta toplina nije bila poznata na početku proračuna, a upravo će ona utjecati na razvoj krivulje, stoga se prethodne jednadžbe nisu mogle koristiti. Rastrup [14] je bio prvi koji je uzeo u obzir utjecaj razvoj temperature u pojedinoj fazi reakcije očvršćivanja. Najvažnija značajka njegovog pristupa je bila ta da se nije računala samo temperatura betona (kao takva), već razvoj stupnja hidratacije u betonu [15].

4.3. METODE REGULACIJE TOPLINE HIDRATACIJE U BETONU

Kako bi se smanjio razvoj topline hidratacije počeli su se koristiti pucolani, a od 1932. godine, cementi niske topline hidratacije. Daljnji napredak u cilju smanjenja maksimalne temperature zbog topline hidratacije postignut je:

- korištenjem manje količine cementnih sastojaka,
- korištenjem drobljenog agregata,
- rashlađivanjem sastojaka betona,
- ograničavanjem visine betonskog bloka koji se betonira,
- rashlađivanje cijevima unutar blokova.

Unatoč tome što je proces stvaranja topline i discipacije bio poznat svim inženjerima građevinarstva, dopuštena temperatura u obujmu betona i temperaturna razlika između unutarnjeg i vanjskog betonskog bloka temeljila se jedino na iskustvu. Presudna svojstva pojedinog betona, na primjer vlačna čvrstoća ili koeficijent toplinskog širenja, nisu se uzimali u obzir.

Pukotine u betonu temelja, mostova, tunelskih obloga i drugih betonskih elemenata postale su velik problem. Pokazalo se da je skupljanje uslijed sušenja od male važnosti, te da je razvoj topline hidratacije glavni uzrok naprezanja i pukotina u armiranom i nearmiranom betonu.

Kasnih šezdesetih, prvi put su se pokušale procijeniti veličine naprezanja zbog spriječenih deformacija i usporediti ih s povećanjem tlačne čvrstoće u mladom betonu. Pritom su uočena dva problema:

- rezultati izračuna toplinskih naprezanja bitno ovise o spriječenosti deformacija unutar betona kako se on pretvara iz kvazi-tekućeg u čvrsto stanje [16],
- ne postoje podaci za vrednovanje izračunatih naprezanja nastalih zbog spriječenih naprezanja.

Provedena su brojna istraživanja kako bi se otkrila otpornost mladog betona prema naprezanjima, i vjerojatnost pojave pukotina. Pokazalo se da su betoni visokih čvrstoća izuzetno osjetljivi materijali s obzirom na pojavu pukotina u mladom betonu. To nije samo posljedica topline hidratacije. Važan utjecaj mogu imati i kemijsko skupljanje zbog samoisušivanja te kemijske reakcije sulfatne faze [15].

Neočekivana pojava pukotina u betonu i masivnom betonu ne može se pripisati nedostatku iskustva građevinskih inženjera. Općenito je nedovoljno informacija o mnogim problemima u tom području znanosti, što motivira za daljnja istraživanja.

4.4. OVISNOST TOPLINSKE PROVODLJIVOSTI λ O HIDRATACIJI

Spoznaja da je stupanj hidratacije veoma važan parametar u numeričkim postupcima za određivanje raspodjele temperature u mladom betonu, uključujući njegovu važnost za razvoj mehaničkih svojstava materijala i rizik pojave pukotina u mladom betonu uslijed razvoja topline hidratacije, rezultirala je korištenjem stupnja hidratacije kao parametra, koji se danas koristi, u svim modernim numeričkim modelima za predviđanje utjecaja razvoja topline hidratacije [15].

To je velik napredak jer se prilikom prijelaza materijala iz jednog u drugo agregatno stanje mijenjaju, ne samo mehanička, već i toplinska svojstva čija se promjena u vremenu nije dugo uzimala u obzir u proračunima. Za vrijeme hidratacije cementa i očvršćivanja betona, na terenu ili u pogonu za izradu predgotovljenih elemenata, uvijek postoji rizik pojave pukotina u ranoj fazi što produžava vrijeme proizvodnje u pogonima.

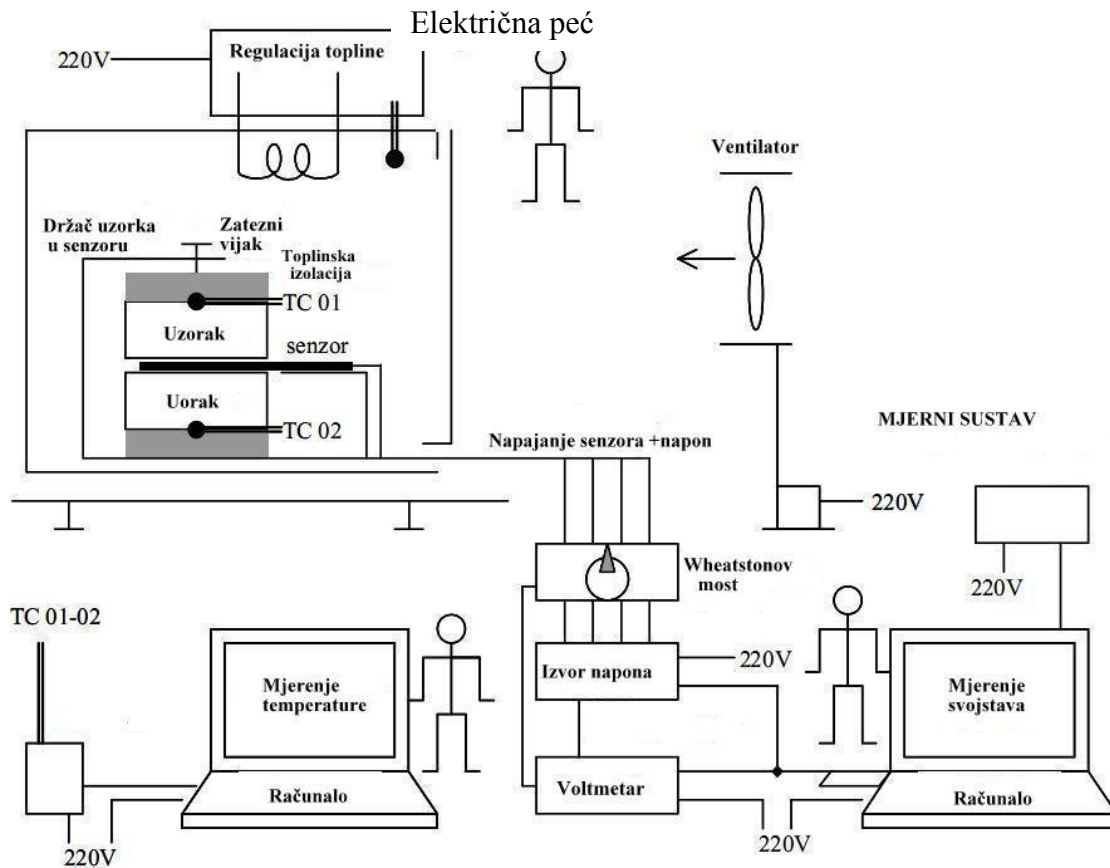
Pri upotrebi modela za predviđanje utjecaja razvoja topline hidratacije, neovisno da li se radi o pojednostavljenom jednodimenzionalnom ili potpuno razvijenom trodimenzionalnom toplinskom prijenosu, kritični ulazni podaci su termo-fizikalna svojstva betona (kao funkcija vremena), uključujući i njegovu gustoću, toplinski kapacitet i toplinsku provodljivost. Ta svojstva ovise o omjeru pojedinih sastojaka betonske mješavine, o termo-fizikalnim svojstvima agregata i svojstvima komponenata u hidratizirajućoj cementnoj pasti (veziva). Potrebnu gustoću je lako izmjeriti, ili je unaprijed poznata, dok su vrijednosti toplinskog kapaciteta i toplinske provodljivosti teže dostupne, osobito za cementnu pastu.

Rezultate prethodnih mjerenja toplinskoga kapaciteta (specifične topline) i toplinske provodljivosti (toplinske difuzivnosti) za cementne materijale saželi su de Schutter i Taerwe [15, 17], od tada je objavljeno još nekoliko dodatnih istraživanja [18, 19, 20, 21, 22, 23]. Većina novijih istraživanja usmjerena su na toplinsku provodljivost, a dobivene vrijednosti za svojstva hidratizirane cementne paste još uvijek pokazuju znatno raspršenje rezultata, kao što je prikazano u tablici 5.

Tablica 5. Literaturne vrijednosti za toplinsku provodljivost hidratizirajuće cementne paste [24]

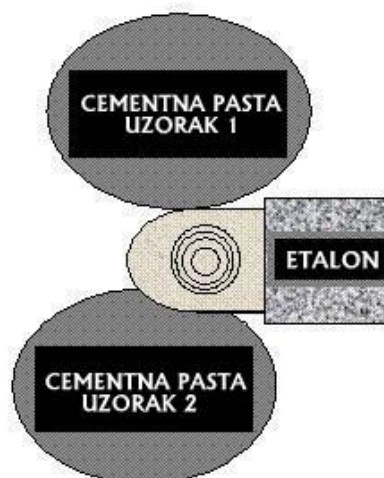
METODA	PODACI O PASTI	[W/(mK)]
<i>Nestacionarna metoda (toplinska difuzivnost) (19)</i>	v/c = 0,5 T = 30°C Brzo očvršćivanje	0,88 (rana) 0,78 (kasna)
<i>Metoda nestacionarne sonde (13)</i>	v/c = 0,4 T = 20°C Cement - tip V	Svježa – 1,16 Očvrsnula – 0,77
<i>Metoda vrućeg diska (TPS) (12)</i>	Gustoća = 2100 kg/m ³	2,85
<i>Metoda laserske impulsne difuzivnosti (20)</i>	Gustoća = 2010 kg/m ³ v/c = 0,35, 28 dana	0,53
<i>Metoda dvostruke vruće žice (21)</i>	v/c=0,348 Cement - tip I	Svježa - 1,00 28 dana – 1,07
<i>Dva linearna, paralelna senzora (17)</i>	v/c = 0,4 24 sata	1,013

Metoda vrućeg diska, korištena je u Bentzovom [24] istraživanju, za mjerenje toplinskog kapaciteta i toplinske provodljivosti hidratizirajuće cementne paste u svježem stanju do starosti od 28 dana pri temperaturi od 20 °C. Parametri koji su istraživni su: vodocementni omjer ($v/c = 0,3$ ili $v/c = 0,4$) i uvjeti njegovanja. Razvijeni su analitički izrazi za procjenu toplinskog kapaciteta kao funkcija stupnja hidratacije. Izmjerene vrijednosti toplinske provodljivosti svježe cementne paste i poznata vrijednost toplinske provodljivosti vode, koriste se za procjenu toplinske provodljivosti cementa. Zaključeno je da hidratacija ima mali utjecaj na izmjerene vrijednosti toplinske provodljivosti cementne paste.



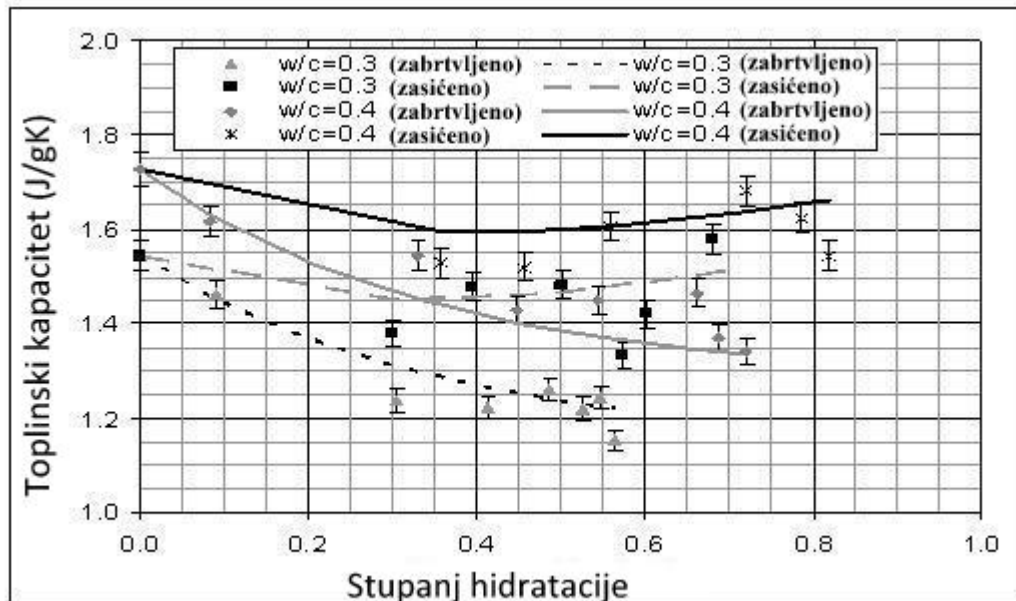
Slika 10. Shematski prikaz metode vrućeg diska [27]

Pripremljeni su uzorci vodocementnog omjera $v/c = 0,3$ i $v/c = 0,4$. Svojstva cementne paste ispitivana su pri starosti od 8 sati i 1, 2, 3, 8, 15 i 28 dana. Osnovna eksperimentalna konfiguracija za mjerenje toplinskih svojstava cementne paste primjenom uređaja "The Hot Disc Thermal Constant Analyzer" prikazana je na slikama 10 i 11 [24].



Slika 11. Shema eksperimentalne konfiguracije za mjerenje toplinskih svojstava para uzoraka cementne paste (dvostrukog) [24]

Rezultati ispitivanja promjene specifičnog toplinskog kapaciteta i toplinske provodljivosti cementne paste dani su na slikama 12 i 13.

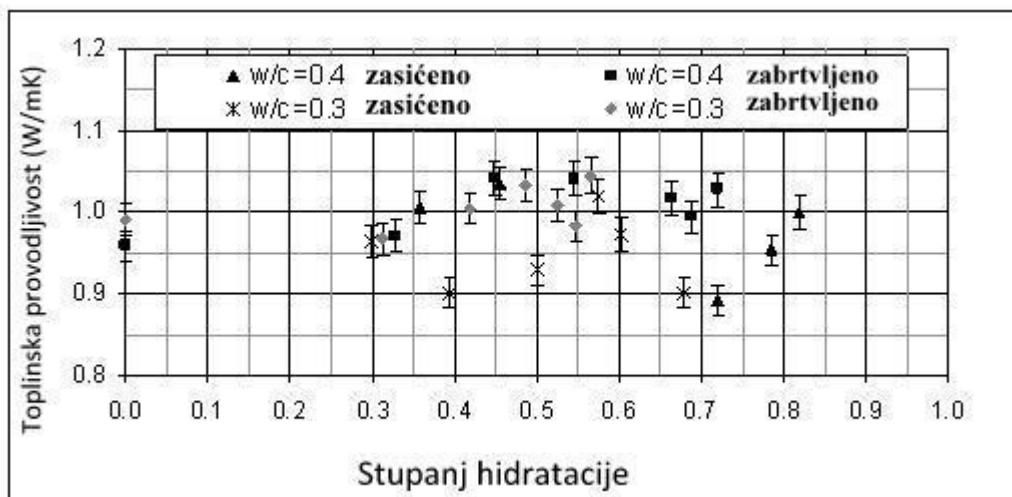


Slika 12. Izmjereni toplinski kapaciteti hidratizirajuće cementne paste, kao funkcija stupnja hidratacije za očvršćivanje u zasićenim i zabrtvljenim uvjetima [24].

Toplinski kapacitet se u ranoj fazi hidratacije cementne paste znatno smanjuje zato što se voda u porama kemijski i fizički veže u hidratacijske produkte (gel).

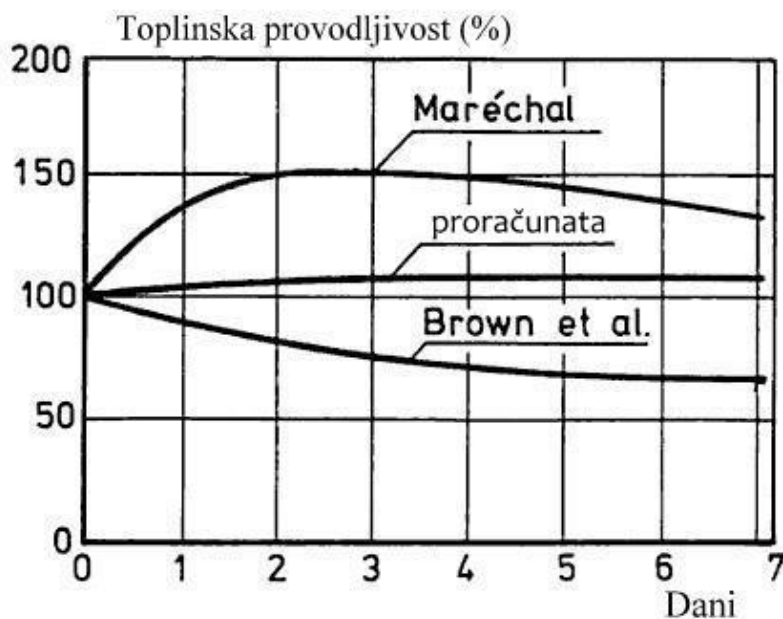
Slično se može zaključiti za vodu, koja ima neuobičajeno visoki toplinski kapacitet zbog energije koja se troši prilikom savijanja i lomljenja veza. Moguće je da će se manji lomovi i savijanja dogoditi u "krućoj" vodi, što bi dovelo do nižeg toplinskog kapaciteta. Toplinski kapacitet leda (vode u krutom agregatnom stanju) je polovica vrijednosti toplinskog kapaciteta tekuće vode, što potvrđuje pretpostavku da molekule vode postaju manje pokretne za vrijeme hidratacije cementa i zbog toga se toplinski kapacitet cementne paste smanjuje [24, 28].

Rezultati mjerenja toplinske provodljivosti cementne paste prikazani su na slici 13, s time da je prihvaćena vrijednost toplinske provodljivosti od 1,00 W/mK za oba vodocementna omjera i uvjeta njegovanja. Ocjenjeno je također da se rezultati slažu s vrijednostima prikazanim u tablici 5.



Slika 13. Izmjerene vrijednosti toplinske provodljivosti cimente paste kao funkcije stupnja hidratacije [24]

Na slici 14. prikazani su rezultati istraživanja promjene toplinske provodljivosti za beton do starosti od 7 dana prema različitim autorima.



Slika 14. Promjena toplinske provodljivosti betona u ovisnosti o vremenu [15]

Marechal [29] je došao do zaključka da se toplinska provodljivost cementne paste poveća do 50% u prva četiri dana starosti betona, s druge strane Brown i Hundt [15] su primjetili da se toplinska provodljivost betona smanjuje za 20 do 30%. Analitička procjena transformacije cementa i vode u gel provedena na osnovi modela za porozne materijale nije otkrila značajniji pad toplinske provodljivosti betona [30], dapače slaže se s istraživanjima Morabita [23] i Marechala [29].

5. METODE ISPITIVANJA TOPLINSKE PROVODLJIVOSTI MATERIJALA

5.1. MJERENJE TOPLINSKE PROVODLJIVOSTI PLOČASTIM UREĐAJEM SA ZAŠTIĆENOM VRUĆOM PLOČOM

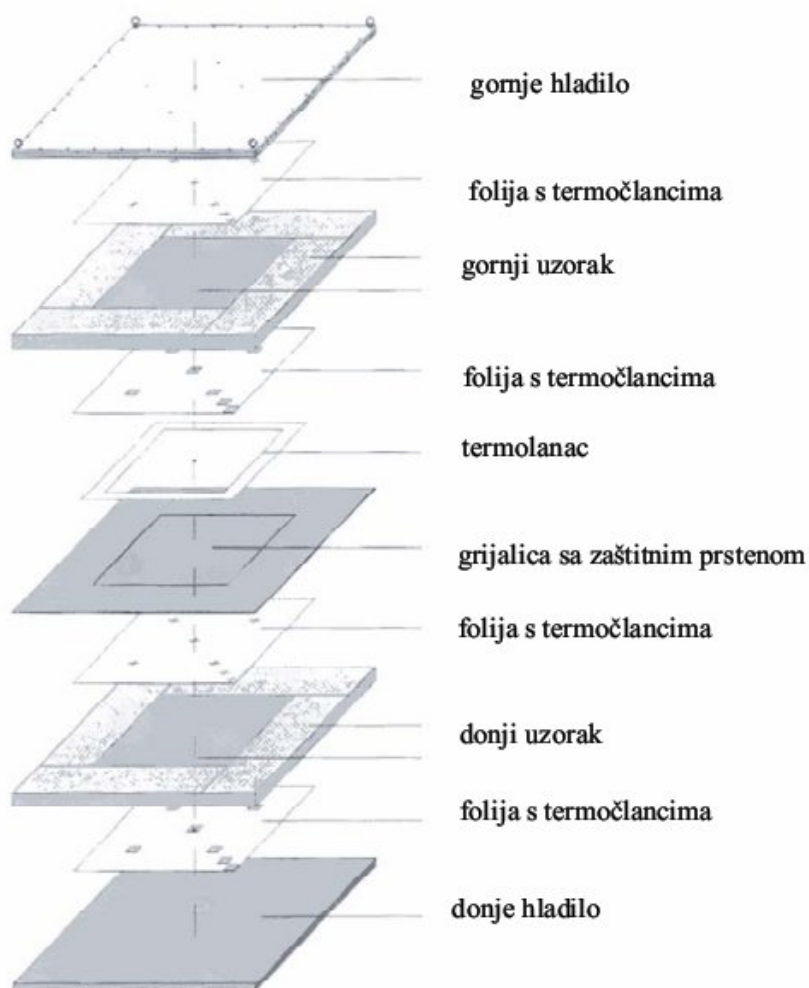
(HRN EN 1946-2: 2000 (Toplinske značajke građevnih proizvoda i elemenata - Posebni kriteriji za ocjenu laboratorija koji mjere svojstva prenošenja topline – 2. dio: Mjerenje pločastim uređajem sa zaštićenom vrućom pločom - Kruti uzorci testirani kontaktnom pločom) [31]

Mjerenje se provodi u Pönsgenovom uređaju sa zaštićenom vrućom pločom. To je apsolutna mjerna metoda jer se mjerenjem temperature, električne snage i debljine uzoraka izravno može izračunati toplinska provodljivost. Proizvođač toplinsko-izolacijskog materijala, mjeri, računa i iskazuje "deklariranu toplinsku provodljivost", s obzirom na koju se materijal svrstava u odgovarajući razred. Takva deklarirana toplinska provodljivost se provjerava u neovisnom laboratoriju. Praksa je da se toplinska provodljivost mjeri u tri mjerne točke pri čemu se dobiju tri toplinske provodljivosti za tri različite srednje temperature. Za navedene tri mjerne točke linearnom regresijom izračuna se ovisnost toplinske provodljivosti o srednjoj temperaturi i izrazi se jednadžbom pravca. S obzirom da za svaku od tri mjerne točke period ustaljenosti traje barem 8 sati, mjerenje toplinske provodljivosti stacionarnom metodom na jednom uzorku toplinsko-izolacijskog materijala traje najmanje jedan dan. Budući da se toplinska provodljivost ispituje jednom u laboratoriju proizvođača i jednom u neovisnim laboratorijima i to za svaku pojedinu debljinu i volumensku masu, javlja se potreba za smanjenjem vremena (i troškova) ispitivanja. Izvedba uređaja sa zaštićenom vrućom pločom komplicirana je i skupa [1]. Ovi problemi rezultirali su potrebom za drugim mjernim metodama koje ne traju toliko dugo, kao i za jeftinijom i jednostavnijom opremom. Stacionarne metode su i dalje dominantne metode ispitivanja toplinske provodljivosti toplinsko-izolacijskih materijala, jer se dinamičkim mjerenjima nije pokazalo da se za određene skupine ovih materijala toplinska provodljivost može mjeriti jednako dobro.

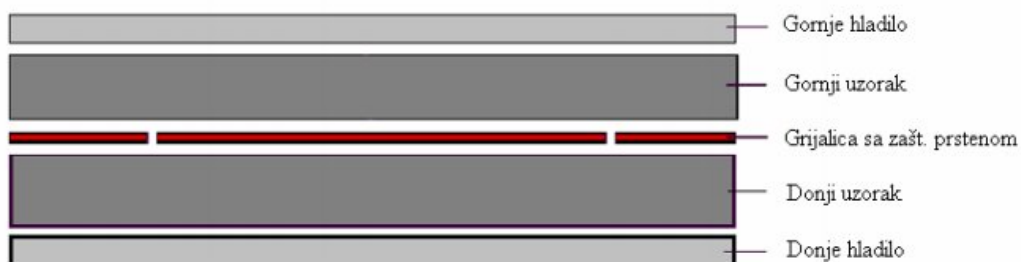
Tehnički opis uređaja:

Uređaj se sastoji od grijalice sa zaštitnim prstenom, gornjeg i donjeg hladila, četiri folije s termočlancima i mjernog toplinskog lanca, kako je prikazano na slici 15, odnosno shematski na slici 16. Uređaj koristi dva uzorka od istog materijala od kojih je jedan smješten ispod, a drugi iznad grijalice. Također, iznad, odnosno ispod uzoraka nalaze se dva hladila. Zbog

temperaturnog pada od grijalice prema hladilima, kroz oba se uzorka prenosi toplina. Bit mjerjenja je ostvariti prijenos topline vođenjem i okomito na uzorke bez značajnijih bočnih gubitaka (vođenje topline u smjeru jedne osi). Ovo se ostvaruje prisnim naližeganjem toplinski homogenih izotropnih uzoraka na površine grijalice i hladila [1].



Slika 15. Pönsgerov uređaj sa zaštićenom vrućom pločom - mjerni složaj



Slika 16 Pönsgerov uređaj sa zaštićenom vrućom pločom - shematski prikaz

Ispitni uzorci:

Koriste se dva uzorka osim u iznimnim slučajevima kada iz nekog razloga nije moguće pribaviti dva uzorka, nego samo jedan. U tom se slučaju umjesto drugog uzorka rabi umjereni referentni materijal poznate toplinske provodljivosti i poznate ovisnosti njegove toplinske provodljivosti o srednjoj temperaturi. Uzorci su kvadratnog presjeka i moraju biti kondicionirani na 23 °C i 50% ravnotežne vlage, odnosno za neke tipove materijala kao što su toplinske žbuke, moraju se ispitivati u isušenom stanju. Uzorci se isušuju u ventiliranim sušionicima do stalne mase (u skladu s HRN EN ISO 12570: 2002,[32]).

Najmanja debljina uzoraka koji se mogu ispitivati iznosi 20 mm, a najveća 200 mm. Površina uzorka mora biti glatka i ravna tako da dobro prijanja uz površinu grijalice i hladila, odnosno da se izbjegne značajni utjecaj kontaktnih otpora.

Duljina jedne stranice uzorka ne smije biti manja od 0,5 m i ne smije biti veća od 1 m, (unutrašnja izmjera uređaja). Najpovoljnije je kad se uzorci izrađuju tako da površina presjeka uzorka iznosi 0,81 m².

Izračun toplinske provodljivosti iz mjernih rezultata:

Toplinska provodljivost (u ustaljenom stanju) izračunava se iz prikupljenih mjernih podataka:

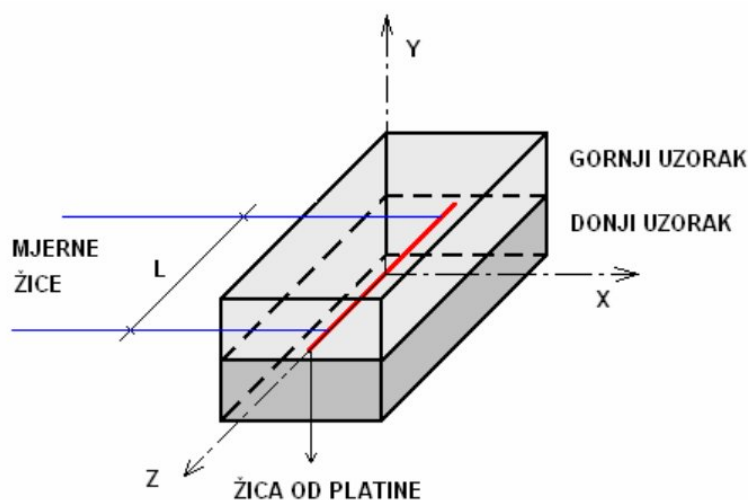
- temperatura toplijih i hladnijih strana oba uzorka,
- električne snage dovedene grijalici $P = U \cdot I$, koja se prenosi na oba uzorka,
- gubitaka snage na zračnom rasporu između grijalice i zaštitnog prstena.

Ustaljenost ili ustaljeno stanje je dovoljno dugačak vremenski interval u kojem se mjerni podaci međusobno ne razlikuju (ne rasipaju se) za više od onog iznosa koji je propisan važećom normom ili nekim drugim dokumentom. Za ovaj slučaj to je vremenski interval u kojem se izmjerene vrijednosti toplinske provodnosti u četiri niza mjerenja (jedan niz = 60 minuta) ne razlikuju međusobno za više od 1% . Mjerenje se provodi u 3 mjerne točke, odnosno na 3 različite srednje ispitne temperature. Iz ovisnosti izmjerenih toplinskih provodljivosti ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$) na tri različite srednje temperature ($\vartheta_{SR1}, \vartheta_{SR2}, \vartheta_{SR3}$) linearnom regresijom se izračuna toplinska provodljivost (λ_{23}) pri + 23 °C.

5.2. MJERENJE TOPLINSKE PROVODLJIVOSTI METODOM VRUĆE ŽICE

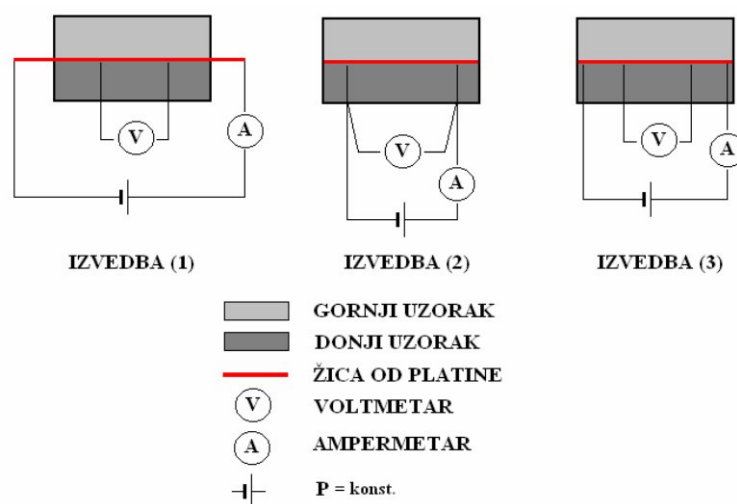
(HRN EN 1946-4: 2002 (Toplinske značajke građevnih proizvoda i elemenata-Posebni kriteriji za ocjenu laboratorija koji mjere svojstva prenošenja topline – 4. dio: Mjerenje metodom vruće komore)[33])

Dinamičko mjerenje toplinske provodljivosti metodom vruće žice temelji se na slijedećem: između dva istovrsna uzorka jednakih izmjera postavi se žica od platine, kao što je shematski prikazano na slici 17, promjera 0,01778 mm ili 0,0254 mm, 99,999 % čistoće i čiji se električni otpor mijenja s promjenom temperature.



Slika 17. Presjek mjernog složaja

Žica od platine (Pt) je ujedno izvor topline i mjerilo temperature (čime se eliminira utjecaj termočlanka i njegovih žica na mjerni rezultat). Žica se postavi tako da ostvaruje što je moguće bolji toplinski kontakt s oba uzorka. Ovakav se mjerni složaj smjesti u komoru koja je izolirana od okoline tako da okolina ne utječe na mjerni proces. Žica od platine (Pt) se spoji na izvor istosmjernog električnog napona stalne snage ($P = \text{konst.}$) zbog čega će se žica zagrijavati, odnosno temperatura žice će rasti i toplina će se prenositi na uzorke. Slika 18 prikazuje tri različite izvedbe mjerenja napona i jakosti električne struje na žici od platine koja se zagrijava snagom konstantnog iznosa [1].



Slika 18. Principi dinamičkog mjerenja toplinske provodljivosti metodom vruće žice

Princip mjerenja:

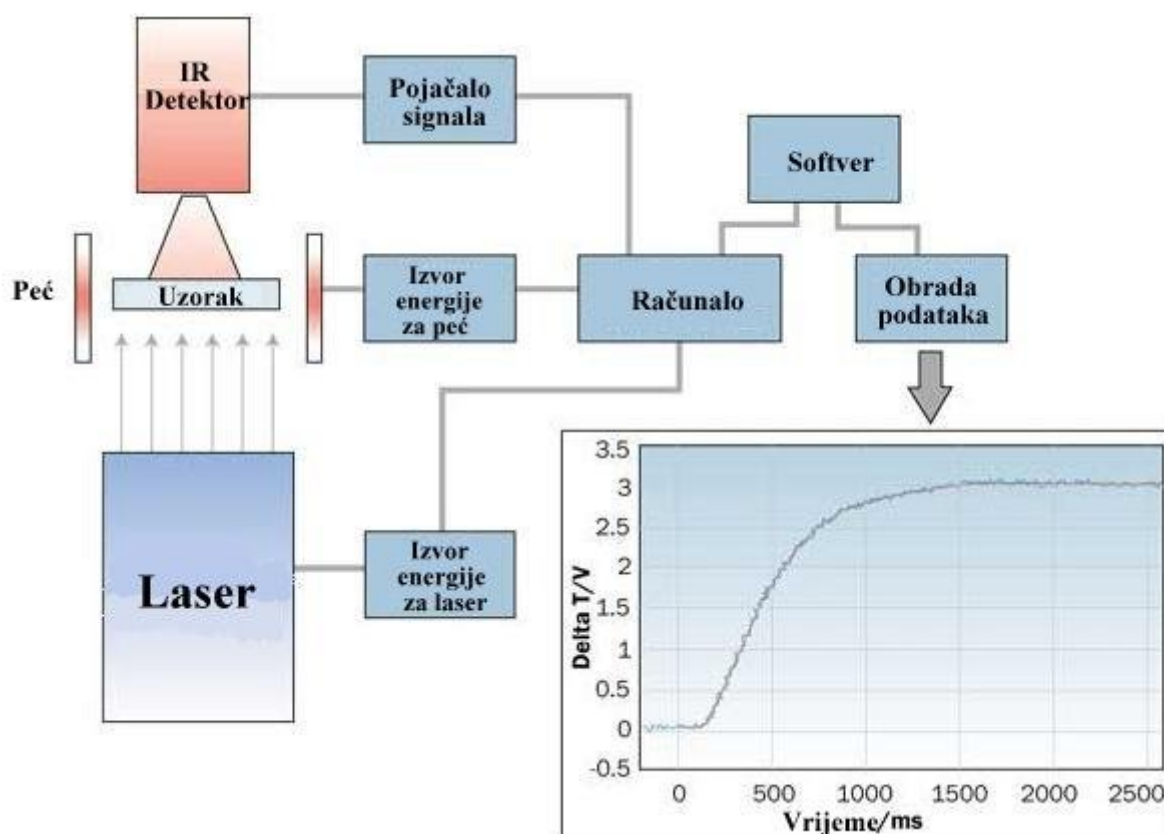
Uzorak toplinsko izolacijskog materijala nad kojim se provodi mjerenje toplinske provodljivosti, izrađuje se u dva jednaka dijela čije su duljine barem 20 cm veće od duljine žice od platine (Pt). Mjerne instrumente i izvor stalne snage potrebno je uključiti barem 2 sata prije mjerenja. Prema specifikaciji proizvođača, idealno vrijeme zagrijavanja ovih uređaja iznosi 2 sata. To je dovoljno vremena da se temperatura uzorka izjednači s temperaturom u samoj komori.

Ispitni uzorci:

Norme proizvoda koje propisuju uvjete pri kojima se ispituje toplinska provodljivost određenog građevnog materijala, propisuju dva različita stanja. Za lake betone, žbuke i mortove, ispitivanja se provode na isušanim uzorcima pri čemu se na kraju ispitivanja moraju računati korekcije s obzirom na promjenu masenog sadržaja vlage tijekom ispitivanja (ako postoji). Za sve ostale građevne materijale (polistireni, mineralne vune, poliuretani i drugi) norme proizvoda propisuju ispitivanja pri 23 °C i 50% vlage. Toplinski impulsi koje proizvodi platinska žica (Pt) brže prolaze kroz uzorak veće toplinske provodljivosti nego kroz uzorak manje toplinske provodljivosti, tako da će se debljina uzorka prilagoditi vrsti materijala. Pri izradi i postavljanju bitno je paziti da su uzorci ravnih i glatkih površina, tako da se ostvari što je moguće bolje nalijeganje jednog uzorka na drugi. Tako se izbjegava značajni utjecaj kontaktnih otpora. Žicu od platine (Pt), zajedno s dvije mjerne žice, treba postaviti tako da ostvaruju idealan kontakt s oba dijela uzorka, da ne postoje zračni jastučići između gornjeg i donjeg dijela uzorka. Širina uzorka mora biti barem jednakog iznosa kao i debljina, s obzirom da se temperaturno polje prostire radijalno oko izvora topline - žice od platine (Pt), dok se duljina uzorka prilagođava mjernoj duljini žice od platine (Pt) [1].

5.3. MJERENJE TOPLINSKE PROVODLJIVOSTI METODOM LASERSKE IMPULSNE DIFUZIVNOSTI (*Laser flash diffusivity method*)

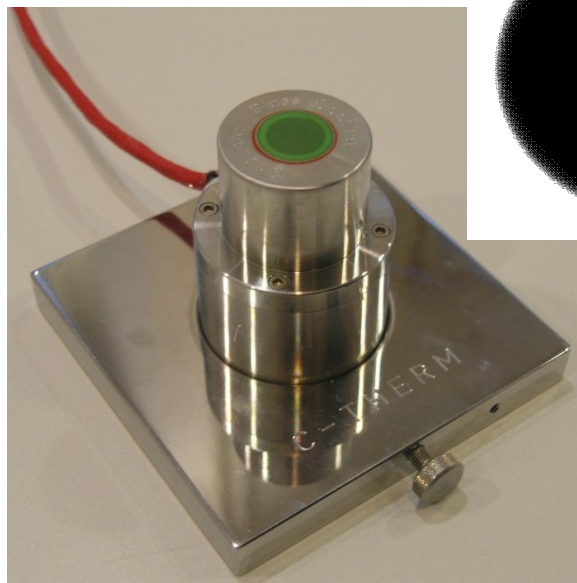
Metoda uključuje primjenu kratkog impulsa topline na prednju stranu uzorka pomoću lasera te mjerenje temperaturne promjene stražnje strane uzorka pomoću infracrvenog detektora. Rezultirajući porast temperature stražnje strane testnog uzorka promatra se kao funkcija vremena i koristi se, zajedno s uzorkom debljine, za određivanje toplinske provodljivosti. Dok ta metoda brzo određuje provodljivost, rezultat je potrebno kombinirati s gustoćom i toplinskim kapacitetom kako bi se mogla izračunati toplinska provodljivost. Shematski prikaz metode mjerenja toplinske provodljivosti metodom laserske impulsne difuzivnosti prikazan je na slici 19 [34].



Slika 19. Shematski prikaz metode laserske impulsivne difuzivnosti

5.4. MJERENJE TOPLINSKE PROVODLJIVOSTI METODOM VRUĆEG DISKA (Transient Plane Source)

Metoda vrućeg diska je nestacionarna metoda pri kojoj je senzor ujedno i zagrijavajući element, a izveden je kao ravninska spirala, disk (slika 20).



Slika 20. Ravninska spirala u senzoru

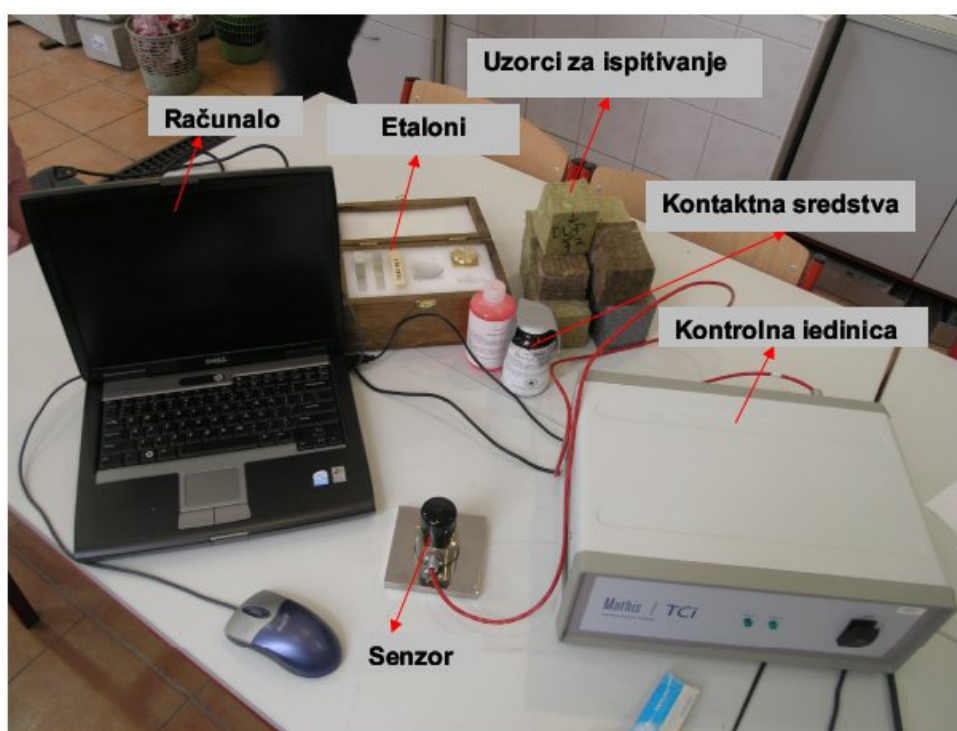
Zagrijavanje elementa, žice od platine, uzrokuje trodimenzionalan toplinski tok unutar uzorka. Temperatura sučeljka se prati kao funkcija vremena, toplinska provodljivost i difuzivnost se računaju pomoću kalibracijske krivulje i izraza detaljnije opisanih u poglavlju 6.2. Kod mjerenja toplinske provodljivosti i efuzivnosti upotrebom metode vrućeg diska nije potrebno poznavati gustoću niti toplinski kapacitet materijala koji se ispituje.

Metoda je prikladna za određene tipove uzoraka, kao što su tekućine i prahovi, dok mjerenje krutog materijala zahtjeva dva identična uzorka istog materijala kako bi se dobila jedna vrijednost toplinske provodljivosti [34, 35, 36].

Detaljniji opis uređaja i softvera korištenog u ovom istraživanju nalazi se u poglavlju 6.

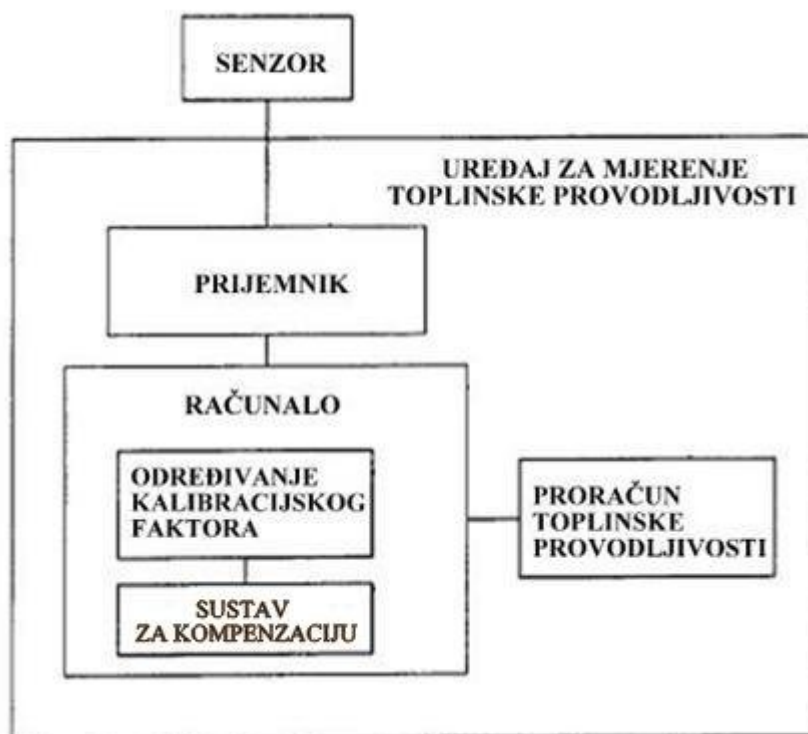
6. OPIS "MATHIS TCi" UREĐAJA I UPUTE ZA RAD

Uređaj se sastoji od tri osnovna dijela a to su senzor, kontrolna jedinica i računalo (slika 21) kojima se prvenstveno mjere toplinska provodljivost i efuzivnost. Uređaj može mjeriti široki raspon vrijednosti koeficijenta toplinske provodljivosti: od 0 do 100 W/mK ili efuzivnosti od 0 do 19000 $W\sqrt{s}/m^2K$ uključujući uzorke u čvrstom stanju, tekućem stanju, praškaste materijale i paste. Raspon okolne temperature u kojem uređaj normalno funkcionira iznosi od -50 do 200 °C. Uređaj je projektiran za rad u laboratorijskom okruženju a jedna od namjena mu je kontroliranje kvalitete materijala u proizvodnim pogonima.



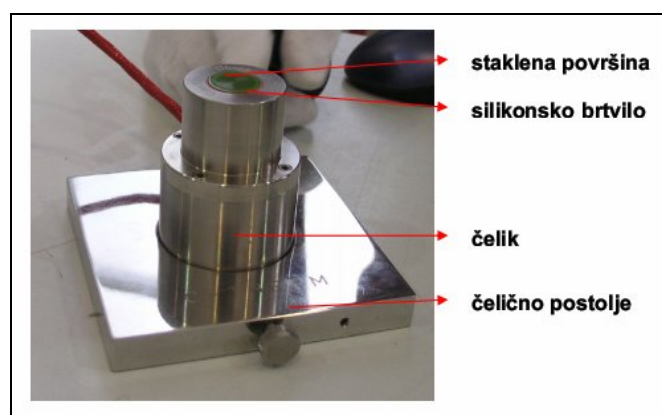
Slika 21. Mathis TCi uređaj

Kućište senzora je od nehrđajućeg čelika, površina gornjeg djela od stakla, te RTV-temperaturno vulkaniziranog silikona za brtvljenje koji služi kao zaštitna barijera staklene površine. Računalo se povezuje s kontrolnom jedinicom posebno projektiranim kabelom koji se mora priključiti prije uključivanja kontrolne jedinice, a softver TCi programa je prethodno instaliran i spreman za korištenje. Shematski prikaz osnovnih dijelova uređaja prikazuju slike 21 i 22, a osnovni dijelovi senzora su prikazani na slici 23.



Slika 22. Shematski prikaz uređaja

Za mjerenje je potrebno pripremiti uzorke koji se prethodno označavaju u svrhu kasnijeg lakšeg raspoznavanja. Budući da je uređaj projektiran za rad u laboratorijskim uvjetima, dimenzije uzorka se prilagođavaju uvjetima rada.



Slika 23. Senzor

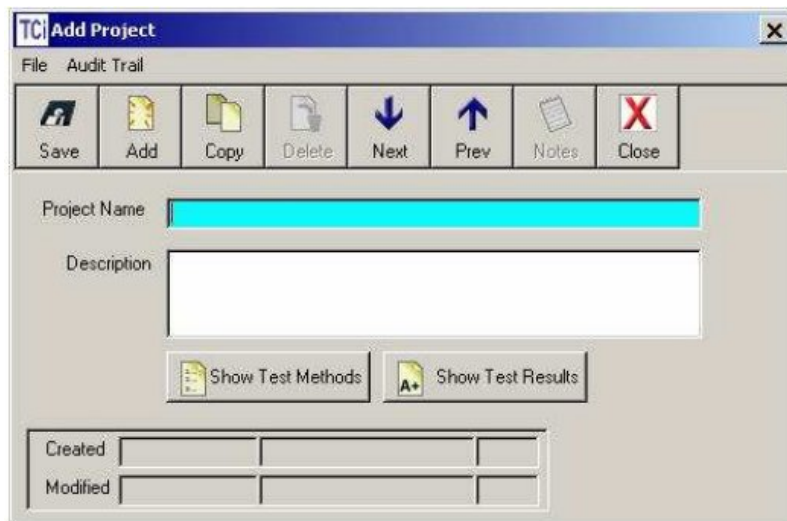
Na svaki uzorak mase manje od 150 g stavlja se uteg od 500 g da se osigura bolji kontakt između uzorka i površine senzora. Na uzorak mase veće od 150 g nije potrebno staviti uteg jer težina samog uzorka osigurava dobar kontakt između uzorka i površine senzora. Prije prvog mjerenja preporuča se napraviti nekoliko mjerenja na etalonima kako bi se uklonile moguće nepravilnosti u radu uređaja.

6.1. SOFTVER "MATHIS TCi" UREĐAJA

Softver za ispitivanje toplinske provodljivosti materijala "Mathis TCi" uređajem omogućuje jednostavno, brzo i praktično provođenje mjerenja.

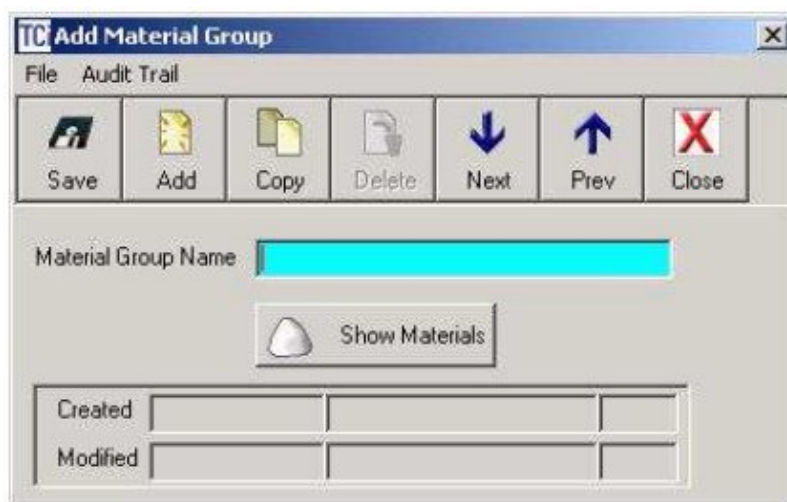
Na slikama 24 – 32 prikazani su koraci pri radu u programu "TCi" uređaja, i podaci koje program zahtijeva da se unose po određenom redoslijedu [37]:

1. Novo ispitivanje = Project (slika 24) → Započinje li se novo ispitivanje, uređaj zahtijeva unošenje imena pod kojim će spremiti podatke o izmjerenim toplinskim svojstvima u obliku dokumenta. Zbog jednostavnijeg korištenja preporuča se grupu mjerenja imenovati prema vrsti materijala čija su se svojstva mjerila ili prema oznaci kojom se određeni uzorak prethodno označio.



Slika 24. Novo ispitivanje

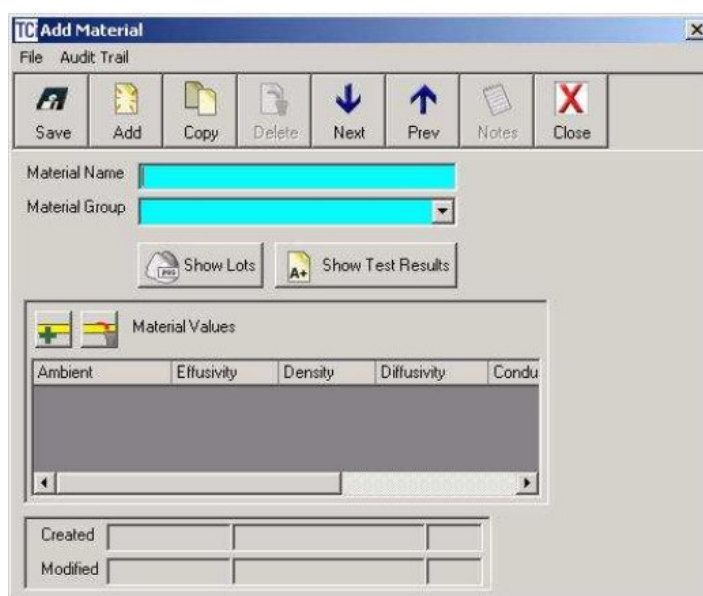
2. Grupa materijala = Material Group (slika 25) → U ovom koraku unosi se podatak da li će se ispitivati svojstva keramičkih materijala, kompozitnih materijala, pjena ili prahova.



Slika 25. Grupa materijala

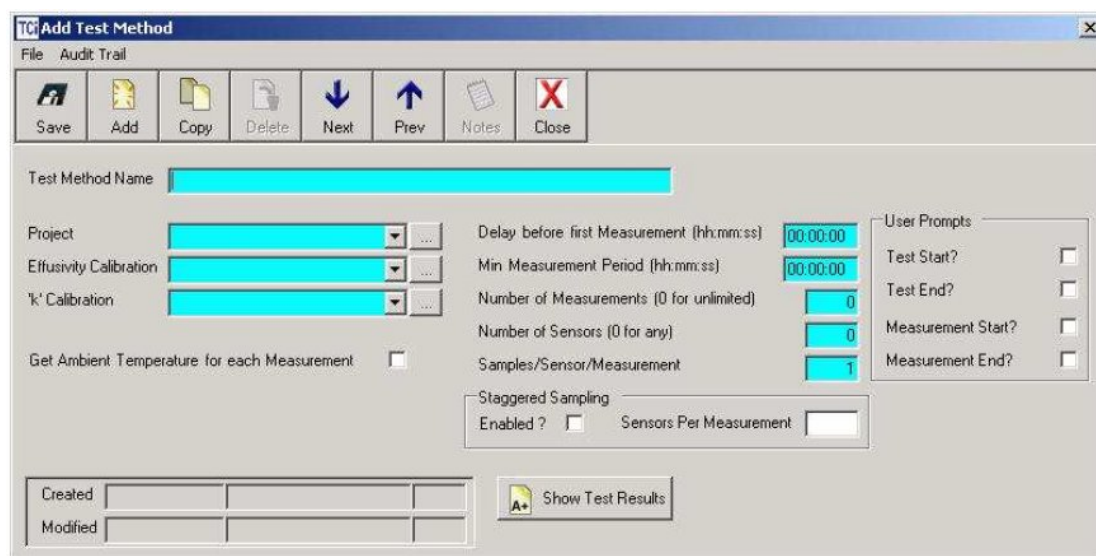
Nakon što je unesen podatak o grupi materijala potrebno je odabrati opciju "Spremi" ("Save") kako bi podaci bili spremljeni i kako bi se moglo pristupiti idućem koraku.

3. Materijal = Material → Na slici 26 prikazana su dva plava okvira koja označavaju ime i grupu materijala, ali ti podaci su već prethodno uneseni u memoriju. U ovom koraku je riječ o unosu podataka o gustoći materijala koji se ispituje, a to se postiže "klikom" na tipku označenu zelenim znakom plusa ("A+"). Nakon toga ponovno je potrebno odabrati opciju "Spremi" ("Save").



Slika 26. Karakteristike materijala

4. Vrste ispitivanja = Test Method (slika 27) → Unosi se naziv, odabire krivulja kalibracije za efuzivnost i toplinsku provodljivost, odnosno podatak mjeri li se keramika, kompozit ili pjena kako bi softver mogao izvršiti kalibraciju rezultata mjerenja prema dotičnoj krivulji, broj mjerenja (ako se ne unese taj podatak, uređaj će mjeriti beskonačan broj puta ili dok korisnik ne zaustavi program), te broj senzora.



Slika 27. Vrsta ispitivanja

Nakon što se sprema navedeni podaci, pristupa se samom ispitivanju uzorka. Označeni uzorci koje se prethodno čuvalo u zahtijevanim uvjetima, na određenoj temperaturi ili vlažnosti (ovdje na sobnoj temperaturi 24,3 °C i vlažnosti 50,2%), uzorak se pažljivo postavlja na senzor pazeći da ne ostane zraka na kontaktu uzorka i senzora. Preporuča se upotreba gumenih rukavica kako bi se spriječio prijelaz topline s ljudskog tijela na uzorak. Ovisno ispituju li se toplinska svojstva uzorka s ili bez kontaktnog sredstva, stavljaju se voda, glycol ili glycerin (Tablica 6)

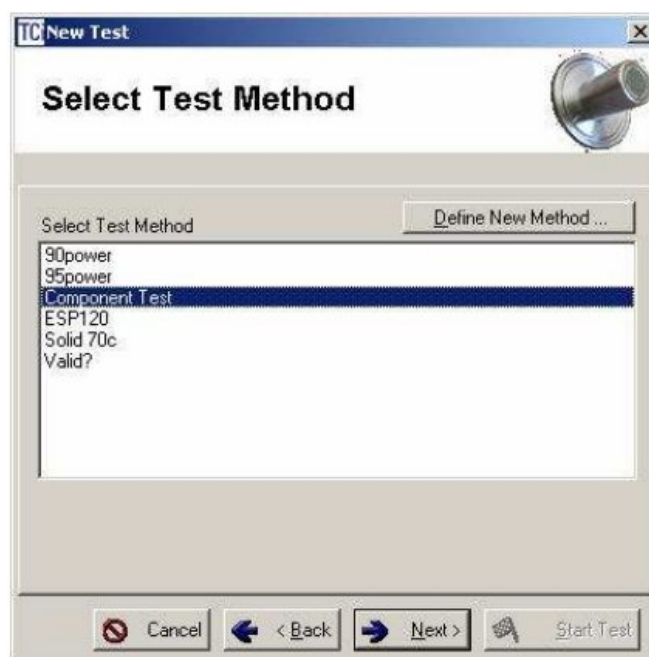
Tablica 6. Uporaba kontaktnih sredstava

Vrsta materijala	Kontaktno sredstvo	
<i>Tekućine</i>	Nije potrebno	
<i>Prahovi</i>		
<i>Pjene</i>		
<i>Kompozitni materijali</i>	-20 do 5 °C	3 kapljice glycola
<i>Keramike</i>	5 do 70 °C	3 kapljice vode
<i>Metali</i>	70 do 150 °C	3 kapljice glycerina

Nakon što se pažljivo postavi uzorak, odabere se opcija "Novo ispitivanje" ("New test"), definira se "Novi projekt" (slika 28. "Odabir projekta" ("Select project")) i odabere "Nastavi" ("Next") kako bi se u sljedećem prozoru mogla odabrati prethodno zadana "Vrsta ispitivanja" sa svim potrebnim parametrima (slika 29. "Odabir vrste ispitivanja" ("Select Test Method")).



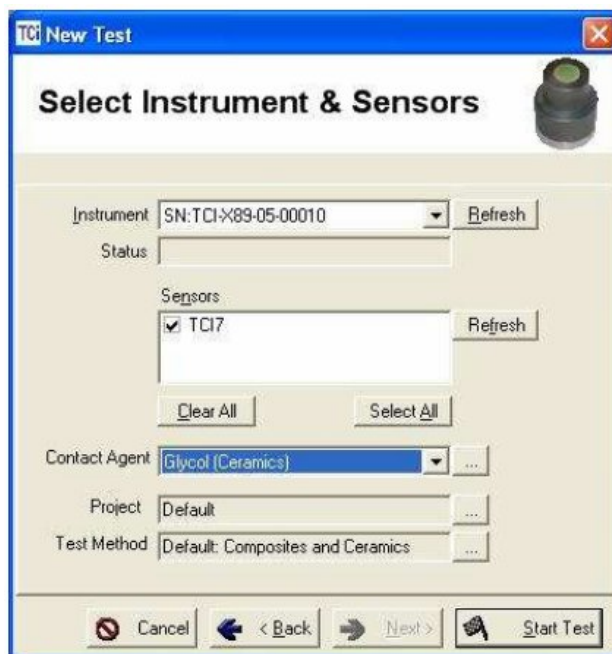
Slika 28. Odabir projekta



Slika 29. Odabir vrste ispitivanja

Ako postoji mogućnost uzorka da upija neko drugo kontaktno sredstvo, kao kontaktno sredstvo stavlja se glycerin.

Odabirom tipke "Nastavi" ("Next") otvara se prozor u kojem je potrebno unijeti podatke u prozore "Uređaj" ("Instrument"), "Senzor" te „Kontaktno sredstvo“ ("Contact Agent"), dakle koji senzor i koje kontaktno sredstvo se koristi prilikom ispitivanja (slika 30). Nakon odabira dugmeta "Započni ispitivanje" ("Start test") počinje ispitivanje (slika 31).



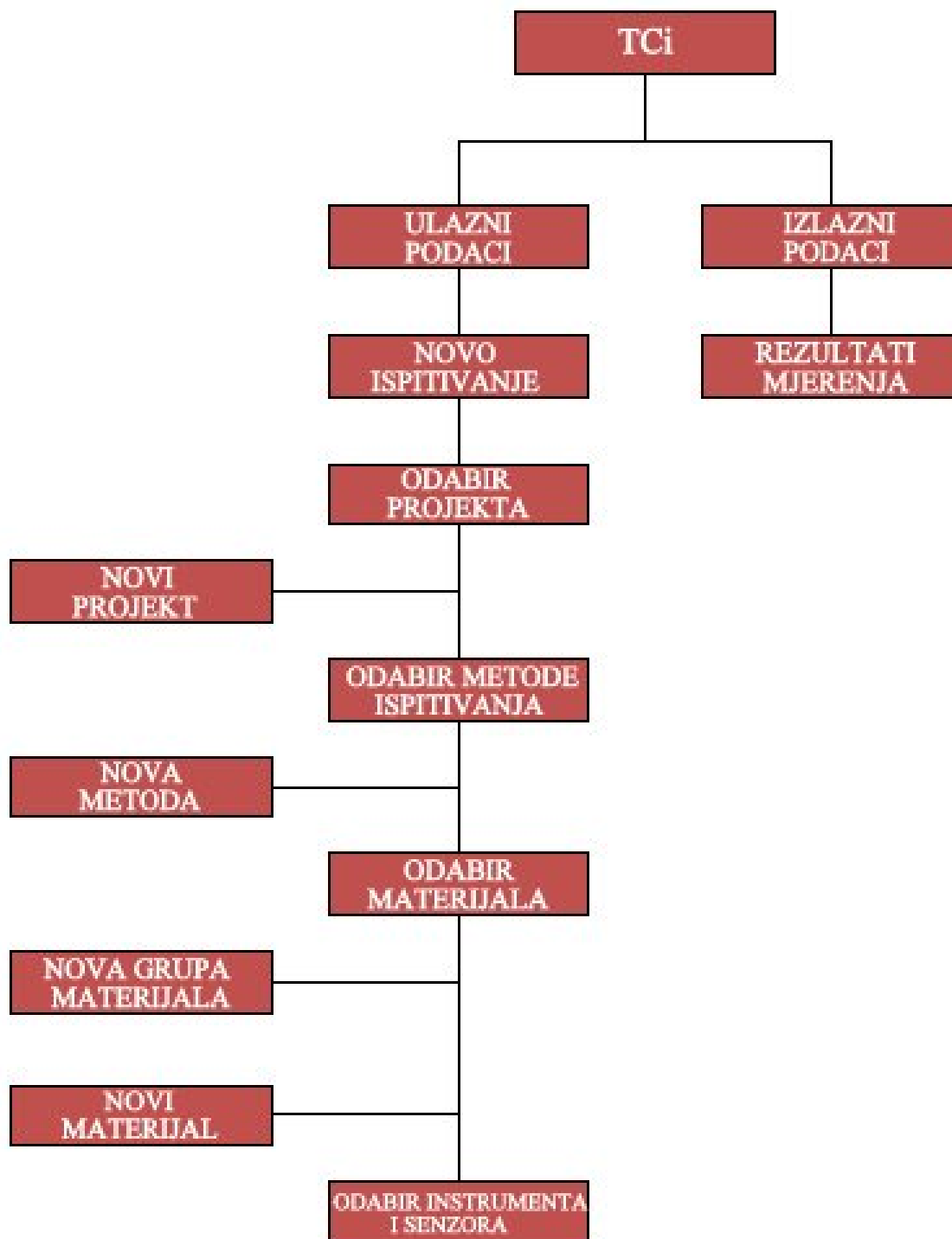
Slika 30. „Započni ispitivanje“ ("Start test")

Rezultati svakog pojedinog mjerenja prikazuju se prilikom samog ispitivanja pa se dobiveni podaci već tada mogu okvirno razmotriti. Ispitivanje se u svakom trenutku može prekinuti odabirom dugmeta "Zaustavi ispitivanje" ("Pause Test") ili "Prekini ispitivanje" ("Stop Test") (slika 31)



Slika 31. Početak ispitivanja

Na slici 32 prikazan je dijagram tijeka unosa potrebnih podataka u program TCi, na način kako je prethodno objašnjeno.



Slika 32. Dijagram tijeka rada Mathis TCi programa

6.2. PRINCIP RADA "MATHIS TCi" UREĐAJA

Jedan od dijelova Mathis TCi uređaja je spiralni grijač sa zaštitnim prstenom, što je detaljnije opisano u poglavlju 6. Svrha zaštitnog prstena je da generira toplinu iznad spiralnog grijača i na taj način aproksimira jednodimenzionalni toplinski tok u smjeru senzor - uzorak. Senzor najprije zagrijava uzorak, a zatim se mjeri reakcija uzorka na toplinsku pobudu. Mjerenje toplinske provodljivosti kao i efuzivnosti zapravo je posredno, jer TCi uređaj mjeri promjenu napona ΔV za poznatu jakost struje I koja se dovodi u senzor i poznati otpor senzora R . Iz toga se može izračunati promjena napona iz izraza:

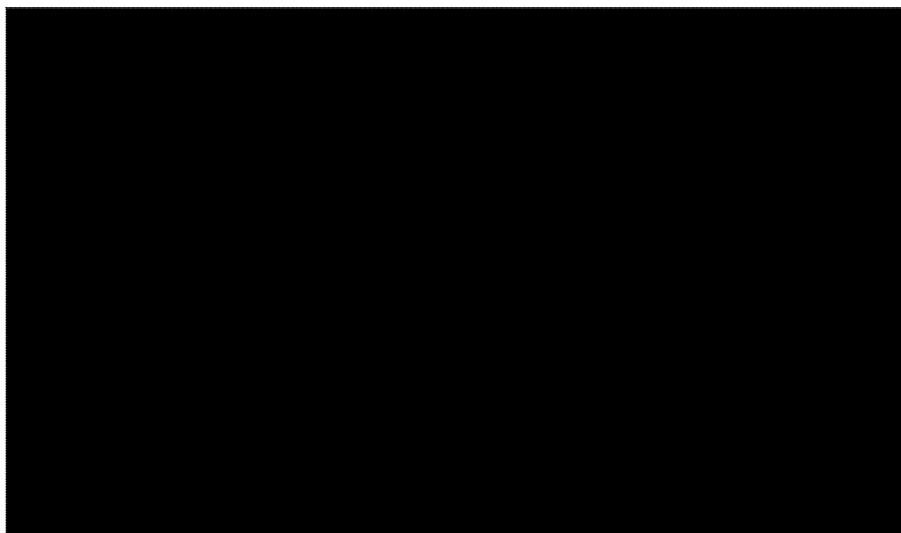
$$V = I \cdot R \quad [\text{V}] \quad (22)$$

Ako je poznata promjena temperature senzora u vremenu, a ako pritom postoji ovisnost između promjene temperature i promjene napona, onda je potrebno pretpostaviti njihovu međusobnu linearnu ovisnost, kako bi se iz promjene temperature mogla dobiti ekvivalentna promjena napona. Pritom se koriste koeficijenti temperaturnog otpora (TCR-temperature coefficient of resistivity) i koristi izraz:

$$R(T) = R_0(1 + \alpha T) = R_0 + A \cdot T \quad [\text{m}^2\text{K/W}] \quad (23)$$

Gdje je:

- $R(T)$ - otpor senzora na temperaturi T ,
- R_0 - otpor senzora na temperaturi 0°C ,
- T - temperatura senzora,
- α - TCR (temperature coefficient of resistivity),
- A - nagib pravca korelacije (otpor-temperatura) (slika 33).



Slika 33. Linearna ovisnost otpora senzora i njegove temperature

Ako se uvede pretpostavka jednodimenzionalnog toplinskog toka i ako se zanemari otpor na kontaktu između senzora i uzorka, promjena temperature izračunava se iz izraza:

$$\Delta T = \frac{1,1284 \cdot G \sqrt{t}}{e_1 + e_2} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (24)$$

Gdje je:

- ΔT [$^{\circ}\text{C}$] - promjena temperature na površini senzora,
- G [W/m^2] - snaga toplinskog toka koji se daje senzoru,
- t [s] - vrijeme mjereno od početka procesa,
- e_1 [$\text{W}\sqrt{\text{s}}/\text{m}^2\text{K}$] - ekvivalentna efuzivnost senzora,
- e_2 [$\text{W}\sqrt{\text{s}}/\text{m}^2\text{K}$] - efuzivnost mjenog materijala.

Uvrsti li se izraz za $R(T) = A \cdot T$ i izraz $V = I \cdot R$ i iz toga se izrazi T , lijeve je strane moguće izjednačiti da bi se iz toga dobio izraz

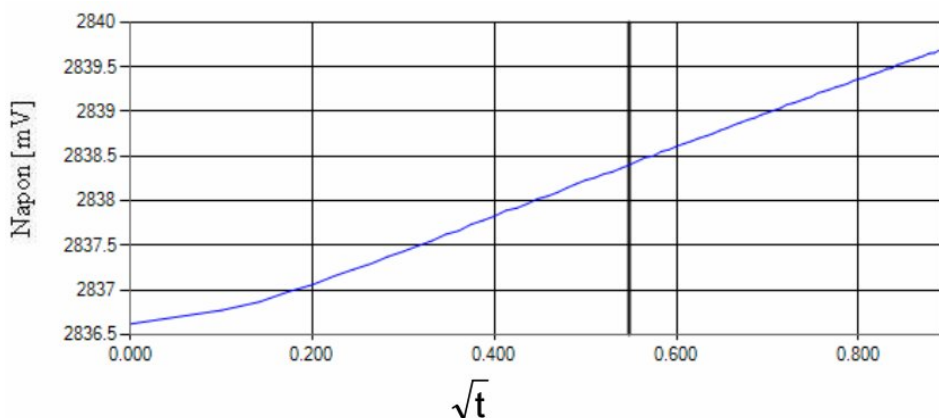
$$\Delta V(t) = \frac{1,1284 \cdot I \cdot A \cdot G \cdot \sqrt{t}}{e_1 + e_2} \quad (25)$$

što se može pisati u obliku:

$$\Delta V(t) = m \cdot \sqrt{t} \quad (26)$$

m je nagib pravca koji opisuje promjenu napona u odnosu na korijen vremena (slika 34) i iznosi:

$$m = \frac{1,1284 \cdot I \cdot A \cdot G}{e_1 + e_2} \quad [\text{V}/\sqrt{\text{s}}] \quad (27)$$



Slika 34. Odnos napona o vremenu

U kratkom vremenskom periodu svi parametri s desne strane dobivene jednadžbe su konstantni pa se efuzivnost uzorka e_2 može izračunati iz izraza dobivenog iz prethodnih jednadžbi, kako slijedi:

$$\frac{1}{m} = M \cdot e_2 + C \quad (28)$$

Gdje je:

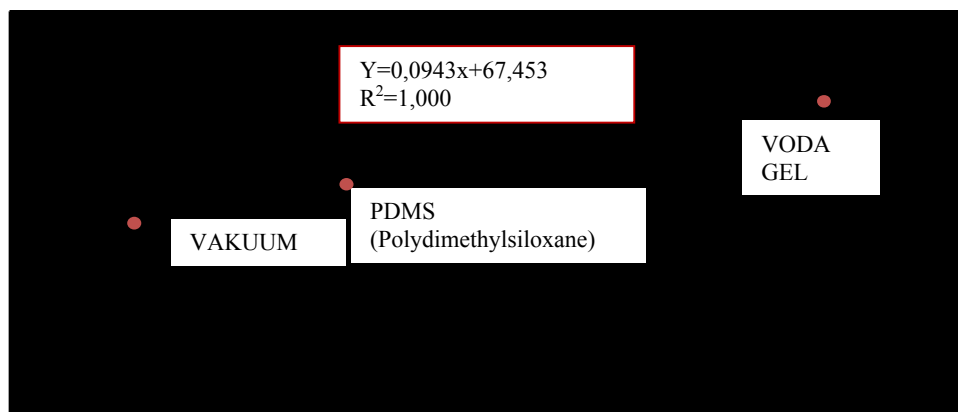
- M - nagib kalibracijske krivulje efuzivnosti i jednak je:

$$M = \frac{1}{1,1284 \cdot I \cdot A \cdot G} \quad (29)$$

- C - koeficijent senzora koji je jednak:

$$C = \frac{e_1}{1,1284 \cdot I \cdot A \cdot G} \quad (30)$$

Koeficijente M i C daje signal senzora iz usporedbe s poznatom efuzivnosti e_2 , što se naziva kalibracijom. Kalibracijske krivulje su pravci (slika 35).



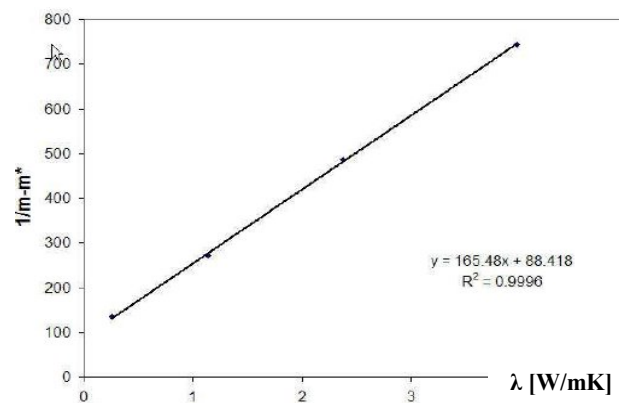
Slika 35 Odnos $1/m$ i efuzivnosti

Toplinska provodljivost λ se računa i kalibrira pomoću algoritma koji se označava sa m^* i pritom se koristi iterativni proces za kalibraciju senzora iz poznatog podatka za koeficijent toplinske provodljivosti nekog drugog materijala. Kalibracijski postupak generira vrijednost m^* takvu da vrijedi izraz:

$$\frac{1}{m - m^*} = \alpha \cdot \lambda + z \quad (31)$$

Gdje je:

- a - nagib pravca,
- z - odsječak na osi x (slika 36).

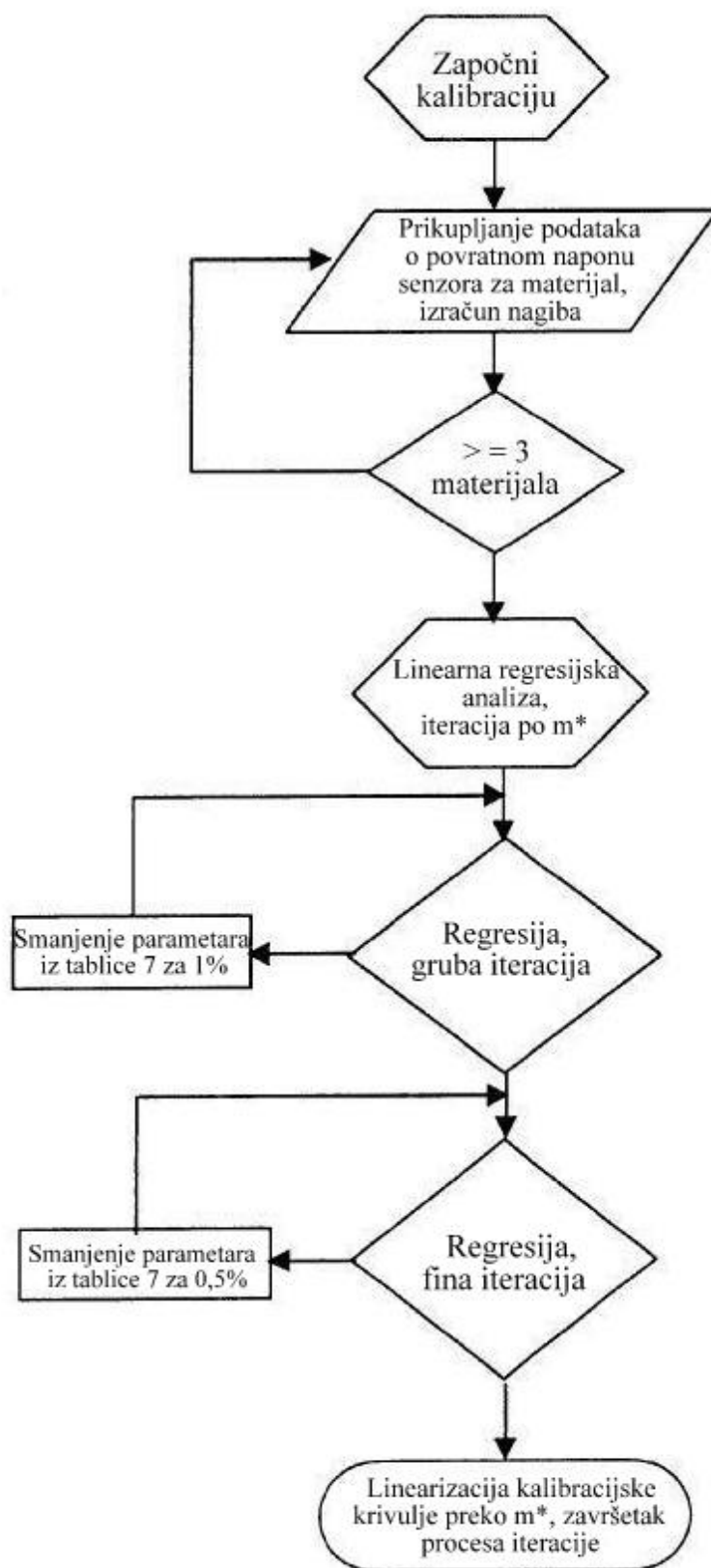


Slika 36. Primjer izgleda kalibracijske krivulje

Iz mjerenja efuzivnosti izračuna se toplinska provodljivost λ . Za izračun su potrebne različite kalibracijske krivulje za materijale koji imaju različita toplinska svojstva. Uređaj "Mathis TCi" kupljen je od proizvođača s kalibriranim senzorom i kalibracijskim krivuljama za polimere, keramiku i pjenu. Parametri kalibracijskih krivulja prikazani su u tablici 7, a shematski prikaz procesa izrade kalibracijskih krivulja na slici 37.

Tablica 7. Parametri kalibracijskih krivulja proizvođača Mathis [38]

Kalibracijska metoda	A	R.0	C0	C1	C2	efuzivnost M0	efuzivnost M1	efuzivnost M2	nagib	m*	odsječak
Polimeri (efuzivnost)	0,093428	25,74829	43,72	0,158439	-0,000171	0,057758	-	-	-	-	-
Polimeri (konduktivnost)	0,093428	25,74829	43,72	0,158439	-0,000171	-	-	-	108,6257	0,002689	76,95081
Keramike (konduktivnost)	0,093428	25,74829	43,72	0,158439	-0,000171	-	-	-	43,52218	0,000821	96,15176
Keramike (efuzivnost)	0,093428	25,74829	43,72	0,158439	-0,000171	-	0,05309609	1,90E-06	-	-	-
Pjene (konduktivnost)	0,093428	25,74829	43,72	0,158439	-0,000171	-	-	-	704,0875	0,011648	85,56854
Pjene (efuzivnost)	0,093428	25,74829	43,72	0,158439	-0,000171	0,037944	-	-	-	-	-



Slika 37. Proces izrade kalibracijskih krivulja [34]

7. ISPITIVANJE TOPLINSKIH SVOJTAVA PRIMJENOM METODE VRUĆEG DISKA, "MATHIS TCi" UREĐAJEM

Građevni materijali koji su ispitivani "Mathis TCi" uređajem su mramor, granit, beton, opeka i ytong. Za svaki uzorak rađena su 3 ispitivanja po 6 mjerenja. Uzorci su ispitivani u potpuno suhom stanju i bez kontaktnog sredstva. Potom su mramor, granit, beton i opeka (slika 38) ispitivani kao suhi uzorci s kontaktnim sredstvom glycolom. Kao što je ranije prikazano u tablici 6 u poglavlju 6.1., kompozitni materijali, keramike i metali na temperaturi između 5 i 70 °C ispituju se s vodom kao kontaktnim sredstvom. Međutim, pokazalo se da uzorci upijaju vodu za vrijeme ispitivanja. Do kraja ispitivanja, 3 kapljice vode koje su predviđene kao kontaktno sredstvo, potpuno su se upijale u uzorak. Primjećene su velike razlike u dobivenim podacima već za vrijeme samog ispitivanja. Vrijednosti toplinske provodljivosti kao i vrijednost specifičnog toplinskog kapaciteta bile su negativne, što nije moguće. Iz tog razloga korišten je glycol kao kontaktno sredstvo.

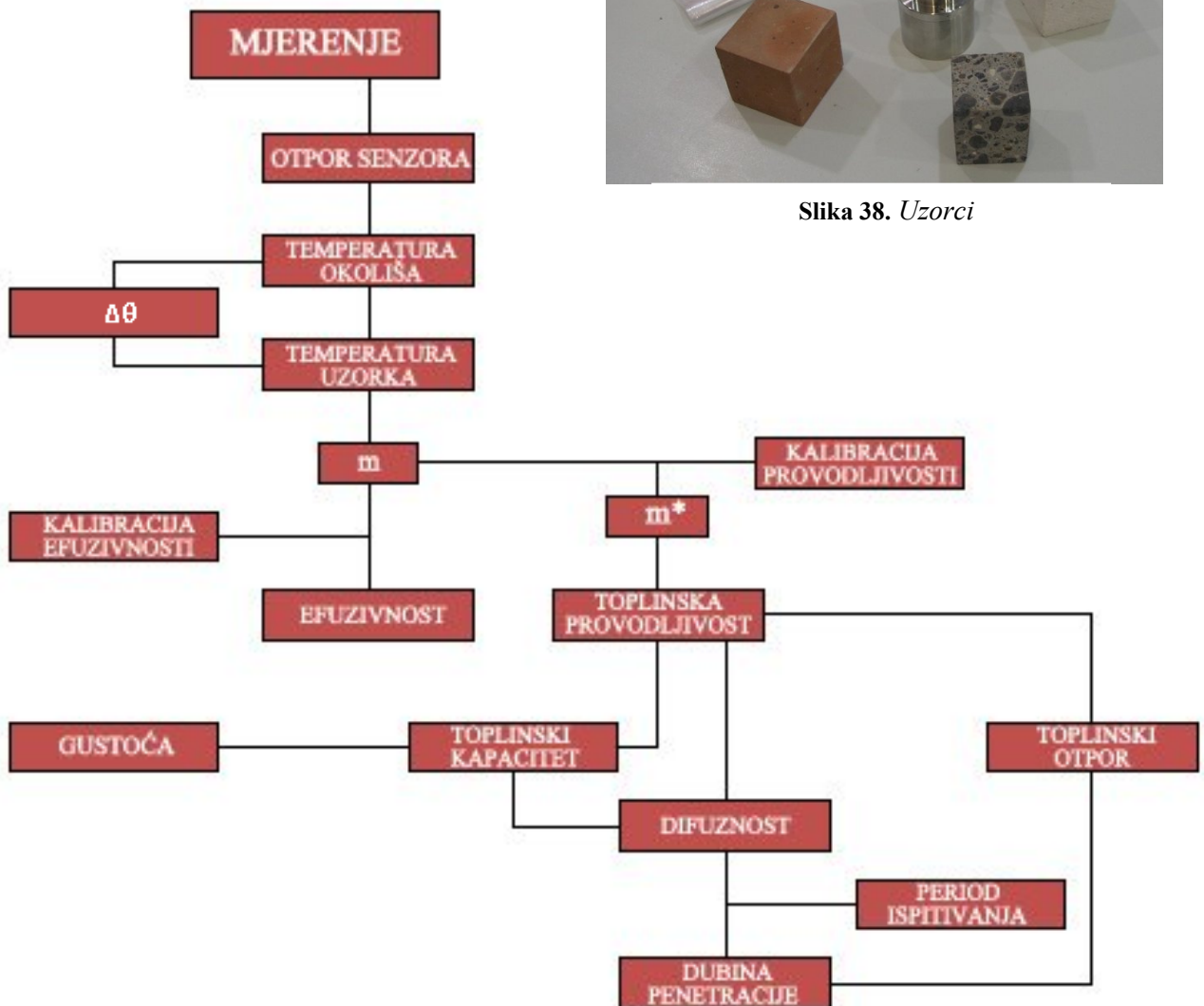
Uzorci mramora, granita, betona i opeke nakon što su ispitani u suhom stanju, čuvani su u vodi 24 sata. Mokri uzorci također su se ispitivali s kontaktnim sredstvom glycolom. Svi uzorci razvrstani su po određenim oznakama. (tablica 8). Tijek ispitivanja "Mathis TCi" uređajem prikazan je na slici 39.

Tablica 8. Prikaz mjerenih materijala i njihovih oznaka

	NAZIV MATERIJALA	GUSTOĆA ρ [kg/m ³]	OZNAKA
Laboratorijski uvjeti <i>vлага</i> = 50,2% <i>temperatura</i> = 24,3°C	<i>opeka</i>	1831,8	O1
	<i>beton</i>	1728,2	B1
	<i>mramor</i>	2314,33	M1
	<i>granit</i>	2869,47	G1
	<i>ytong</i>	507,82	Y
Zasićeni uzorci	<i>mokra opeka</i>		O2
	<i>mokri beton</i>		B2
	<i>mokri mramor</i>		M2
	<i>mokri granit</i>		G2



Slika 38. Uzorci



Slika 39. Dijagram funkcioniranja računalnog programa "Mathis TCi" uređaja

7.1. REZULTATI ISPITIVANJA GRAĐEVNIH MATERIJALA "MATHIS TCI" UREĐAJEM

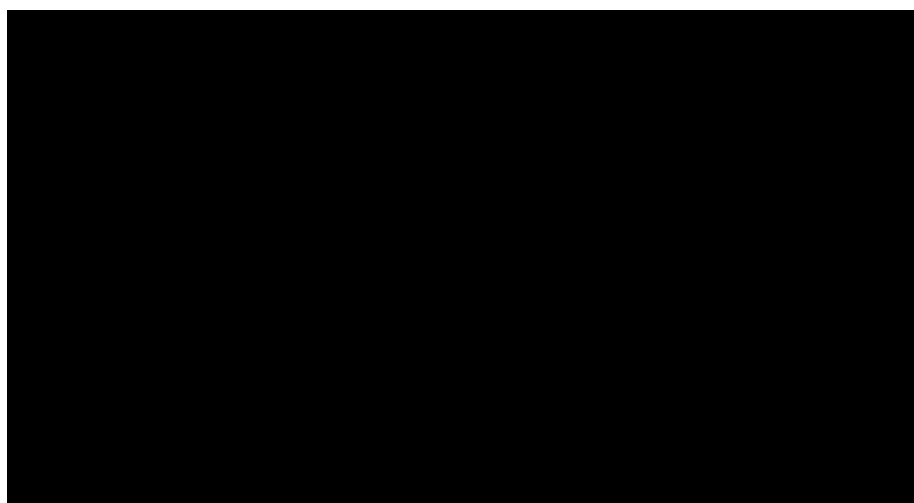
7.1.1. Mramor

M1 (glycol)

Rezultati ispitivanja za uzorak M1 (mramor u suhom stanju) s glycolom kao kontaktnim sredstvom prikazani su u tablici 9, a grafički su prikazani na slici 40.

Tablica 9. Rezultati ispitivanja uzorka mramora (M1)

Broj mjerenja	M1 (ispitivanje 1)		M1 (ispitivanje 2)		M1 (ispitivanje 3)	
	e [W√s/m ² K]	λ [W/mK]	e [W√s/m ² K]	λ [W/mK]	e [W√s/m ² K]	λ [W/mK]
1	2196	2,43	1922	1,92	2031	2,12
2	2185	2,41	1726	1,57	2018	2,1
3	2191	2,42	1709	1,54	2023	2,11
4	1886	1,86	1364	0,95	2024	2,11
5	1662	1,46	1091	0,51	2023	2,11
6	1411	1,03	1854	0,14	2004	2,07
Srednja vrijednost	1921,83	1,93	1611,00	1,11	2020,50	2,10
Standardna devijacija	330,64	0,59	319,38	0,69	9,09	0,02
Koeficijent varijacije	17,20	30,63	19,82	62,42	0,45	0,83



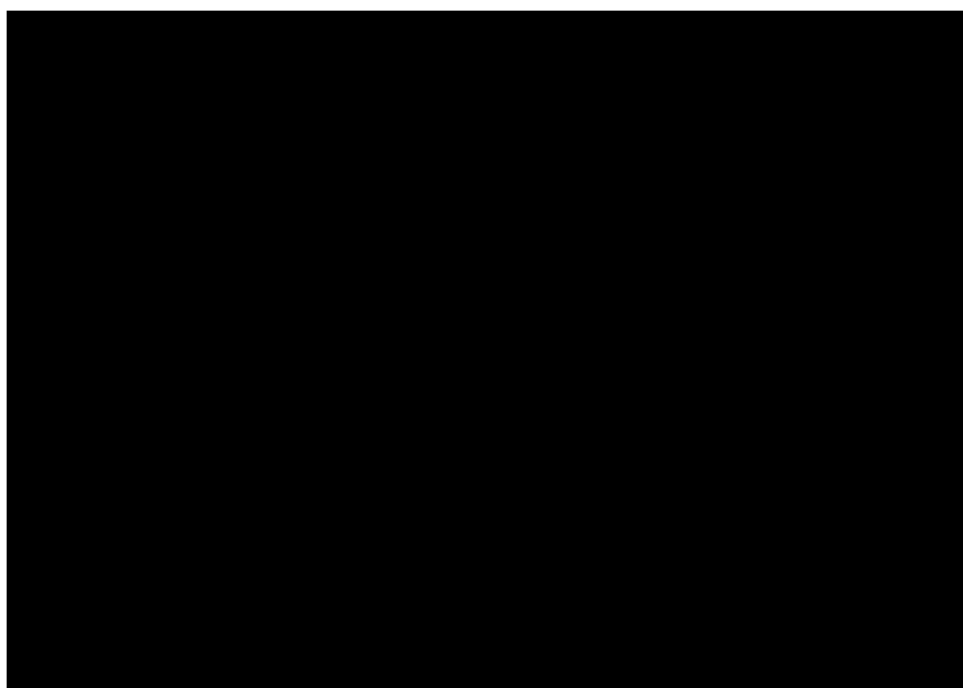
Slika 40. Grafički prikaz rezultata ispitivanja za uzorak M1 s glycolom

M2 (voda)

Rezultati ispitivanja za uzorak M2 (mramor) s vodom kao kontaktnim sredstvom prikazani su u tablici 10, a grafički su prikazani na slici 41.

Tablica 10. Rezultati ispitivanja za uzorak M2 s vodom kao kontaktnim sredstvom

Broj mjerjenja	M2 (ispitivanje 1)		M2 (ispitivanje 2)		M2 (ispitivanje 3)	
	e [W√s/m ² K]	λ [W/mK]	e [W√s/m ² K]	λ [W/mK]	e [W√s/m ² K]	λ [W/mK]
1	2597	3,23	2583	3,2	2633	3,31
2	2638	3,23	2686	3,42	2653	3,35
3	2668	3,32	2680	3,41	2647	3,33
4	2637	3,38	2678	3,4	2667	3,37
5	2631	3,31	2675	3,4	2642	3,33
6	2631	3,30	2699	3,45	2628	3,30
<i>Srednja vrijednost</i>	2633,66	3,30	2666,83	3,38	2645,00	3,33
<i>Standardna devijacija</i>	22,66	0,06	41,94	0,09	14,10	0,03
<i>Koeficijent varijacije [%]</i>	0,86	1,74	1,57	2,67	0,53	0,77



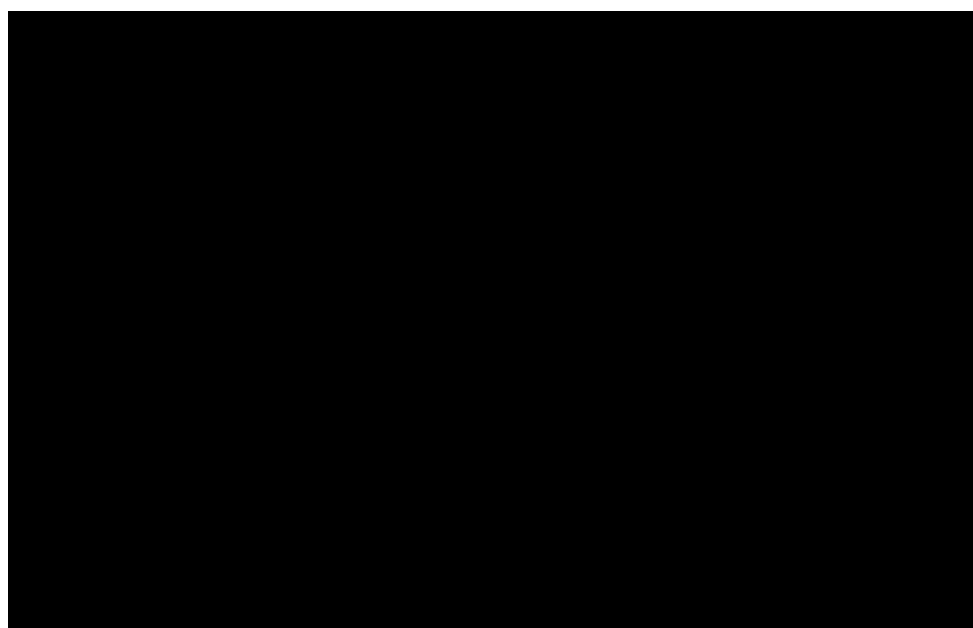
Slika 41. Grafički prikaz rezultata ispitivanja uzorka M2 s vodom kao kontaktnim sredstvom

M2 (glycol)

Rezultati ispitivanja za uzorak M2 (mramor) s glycolom kao kontaktnim sredstvom prikazani su u tablici 11, a grafički na slici 42.

Tablica 11. Rezultati ispitivanja za uzorak M2 s glycolom kao kontaktnim sredstvom

Broj mjerjenja	M2 (ispitivanje 1)		M2 (ispitivanje 2)		M2 (ispitivanje 3)	
	e [W√s/m ² K]	λ [W/mK]	e [W√s/m ² K]	λ [W/mK]	e [W√s/m ² K]	λ [W/mK]
1	2391	2,81	2386	2,81	2361	2,76
2	2387	2,81	2329	2,69	2336	2,71
3	2381	2,79	2339	2,71	2306	2,65
4	2377	2,79	2316	2,67	2306	2,65
5	2353	2,74	2331	2,70	2300	2,64
6	2361	2,76	2307	2,65	2232	2,50
<i>Srednja vrijednost</i>	2375,00	2,78	2334,67	2,71	2306,83	2,65
<i>Standardna devijacija</i>	0,02	0,03	27,62	0,06	43,43	0,09
<i>Koeficijent varijacije</i>	6,30	1,01	1,18	2,06	1,88	3,30



Slika 42. Grafički prikaz rezultata ispitivanja uzorka M2 s glycolom kao kontaktnim sredstvom

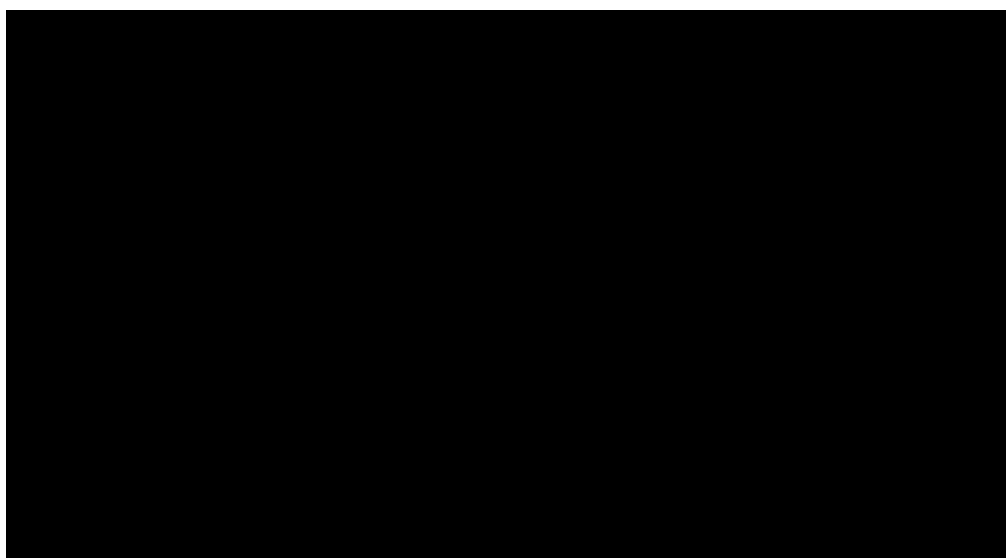
7.1.2. Granit

G1 (glycol)

Rezultati ispitivanja za uzorak G1 (granit u suhom stanju) s glycolom kao kontaktnim sredstvom prikazani su u tablici 12, a grafički na slici 43.

Tablica 12. Rezultati ispitivanja za uzorak G1

Broj mjerjenja	G1 (ispitivanje 1)		G1 (ispitivanje 2)		G1 (ispitivanje 3)	
	e	λ	e	λ	e	λ
	[W√s/m ² K]	[W/mK]	[W√s/m ² K]	[W/mK]	[W√s/m ² K]	[W/mK]
1	2191	2,42	2303	2,64	2084	2,22
2	2181	2,41	2256	2,55	2071	2,20
3	2180	2,40	2252	2,54	2059	2,17
4	2175	2,39	2254	2,55	2061	2,18
5	2178	2,40	2266	2,57	2068	2,19
6	2190	2,42	2259	2,08	2067	2,19
<i>Srednja vrijednost</i>	2182,50	2,41	2265,00	2,50	2068,33	2,19
<i>Standardna devijacija</i>	6,53	0,01	19,25	0,20	8,89	0,02
<i>Koeficijent varijacije</i>	0,30	0,50	0,85	8,10	0,43	0,79



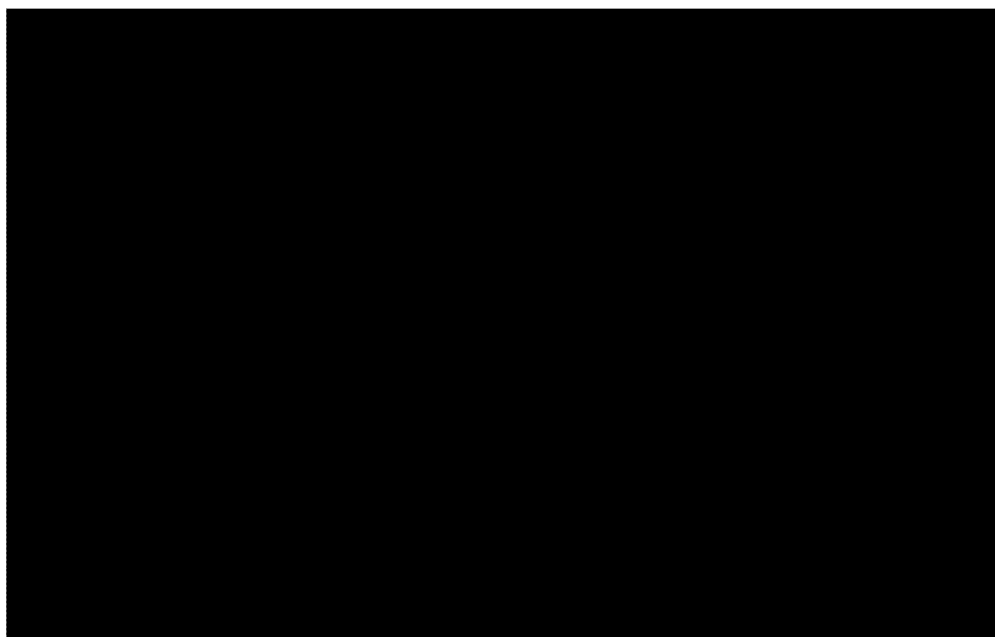
Slika 43. Grafički prikaz rezultata ispitivanja za uzorak G1 s glycolom kao kontaktim sredstvom

G2 (voda)

Rezultati ispitivanja uzorka G2 (granit) s vodom kao kontaktim sredstvom prikazani su u tablici 13, a grafički prikazani na slici 44.

Tablica 13. Rezultati ispitivanja mokrog uzorka G2 s vodom kao kontaktim sredstvom

Broj mjerjenja	G2 (ispitivanje 1)		G2 (ispitivanje 2)		G2 (ispitivanje 3)	
	e	λ	e	λ	e	λ
	[W√s/m ² K]	[W/mK]	[W√s/m ² K]	[W/mK]	[W√s/m ² K]	[W/mK]
1	2407	2,85	2413	2,86	2380	2,79
2	2383	2,80	2430	2,89	2433	2,90
3	2386	2,80	2429	2,89	2421	2,87
4	2401	2,84	2435	2,90	2424	2,88
5	2386	2,80	2426	2,89	2428	2,89
6	2381	2,79	2419	2,87	2419	2,87
<i>Srednja vrijednost</i>	2390,67	2,81	2425,33	2,88	2417,50	2,87
<i>Standardna devijacija</i>	10,67	0,03	8,02	0,02	19,04	0,04
<i>Koeficijent varijacije</i>	0,45	0,89	0,33	0,52	0,79	1,37



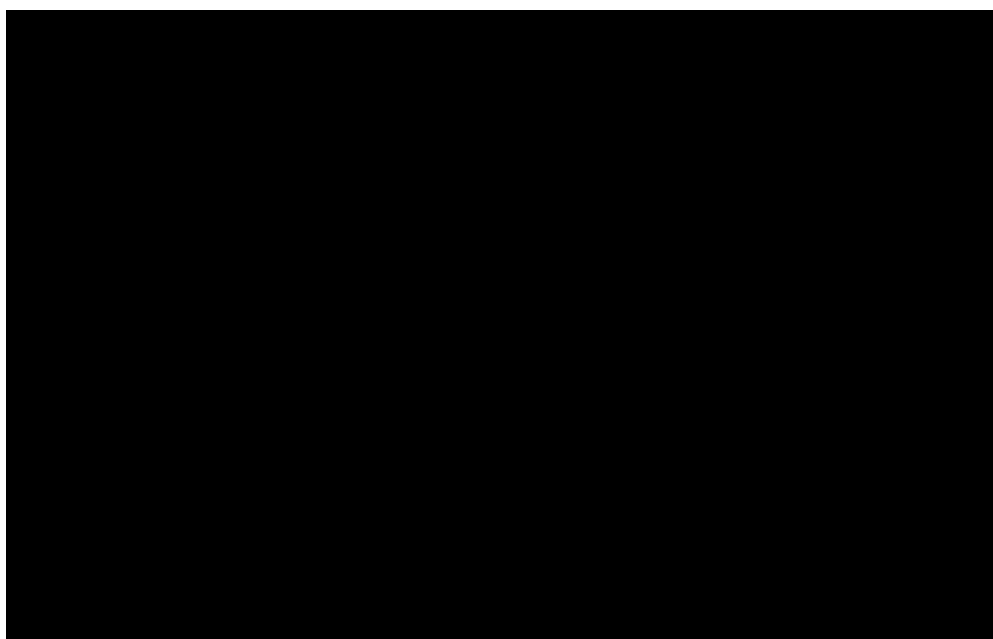
Slika 44. Grafički prikaz rezultata ispitivanja uzorka G2 s vodom kao kontaktim sredstvom

G2 (glycol)

Rezultati ispitivanja uzorka G2 (granit) s glycolom kao kontaktnim sredstvom prikazani su u tablici 14, a grafički prikazani na slici 45.

Tablica 14. Rezultati ispitivanja uzorka G2 s glycolom kao kontaktnim sredstvom

Broj mjerjenja	G2 (ispitivanje 1)		G2 (ispitivanje 2)		G2 (ispitivanje 3)	
	e	λ	e	λ	e	λ
	[W√s/m ² K]	[W/mK]	[W√s/m ² K]	[W/mK]	[W√s/m ² K]	[W/mK]
1	2231	2,50	2,368	2,77	2318	2,67
2	2202	2,45	2,293	2,62	2283	2,60
3	2218	2,48	2,317	2,67	2290	2,62
4	2211	2,46	2,295	2,63	2297	2,63
5	2206	2,45	2291	2,62	2290	2,62
6	2190	2,42	2309	2,65	2286	2,61
<i>Srednja vrijednost</i>	2209,67	2,46	2312,17	2,66	2294,00	2,63
<i>Standardna devijacija</i>	14,04	0,03	29,19	0,06	12,66	0,02
<i>Koeficijent varijacije</i>	0,64	1,12	1,26	2,15	0,55	0,93



Slika 45. Grafički prikaz rezultata ispitivanja uzorka G2 s glycolom kao kontaktnim sredstvom

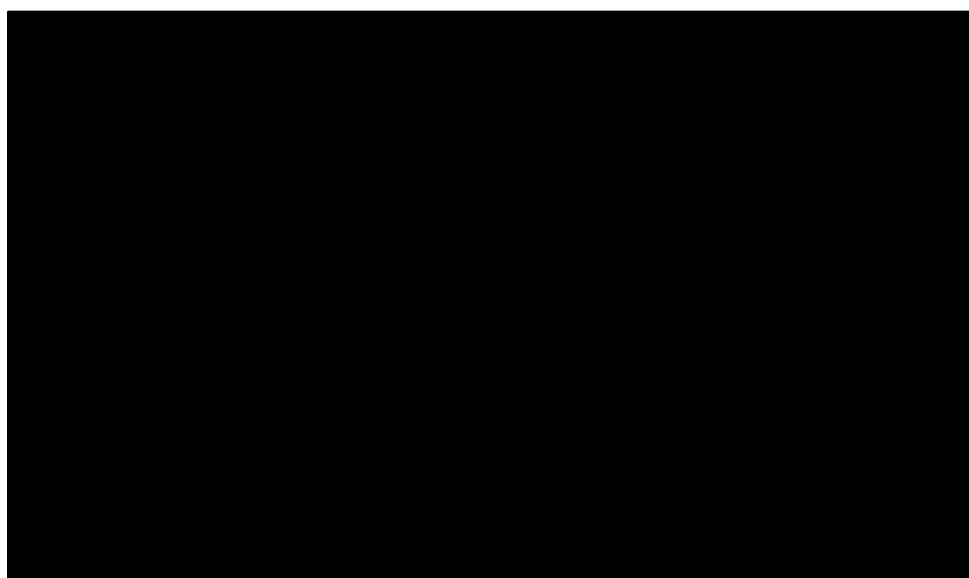
7.1.3. Beton

B1 (glycol)

Rezultati ispitivanja za uzorak B1 (beton u suhom stanju) s glycolom kao kontaktnim sredstvom prikazani su u tablici 15, a grafički prikazani na slici 46.

Tablica 15. Rezultati ispitivanja za uzorak B1 s glycolom kao kontaktnim sredstvom

Broj mjerjenja	B1 (ispitivanje 1)		B1 (ispitivanje 2)		B1 (ispitivanje 3)	
	e [W√s/m ² K]	λ [W/mK]	e [W√s/m ² K]	λ [W/mK]	e [W√s/m ² K]	λ [W/mK]
1	1195	0,67	1285	0,82	1231	0,73
2	1195	0,68	1288	0,82	1209	0,70
3	1205	0,69	1245	0,75	1209	0,70
4	1208	0,69	1033	0,42	1220	0,71
5	1208	0,69	859	0,15	1222	0,72
6	1209	0,70	787	0,04	1223	0,72
<i>Srednja vrijednost</i>	1203,33	0,69	1082,83	0,50	1219,00	0,71
<i>Standardna devijacija</i>	6,59	0,01	223,32	0,35	8,60	0,01
<i>Koeficijent varijacije</i>	0,55	1,50	20,62	69,73	0,71	1,70



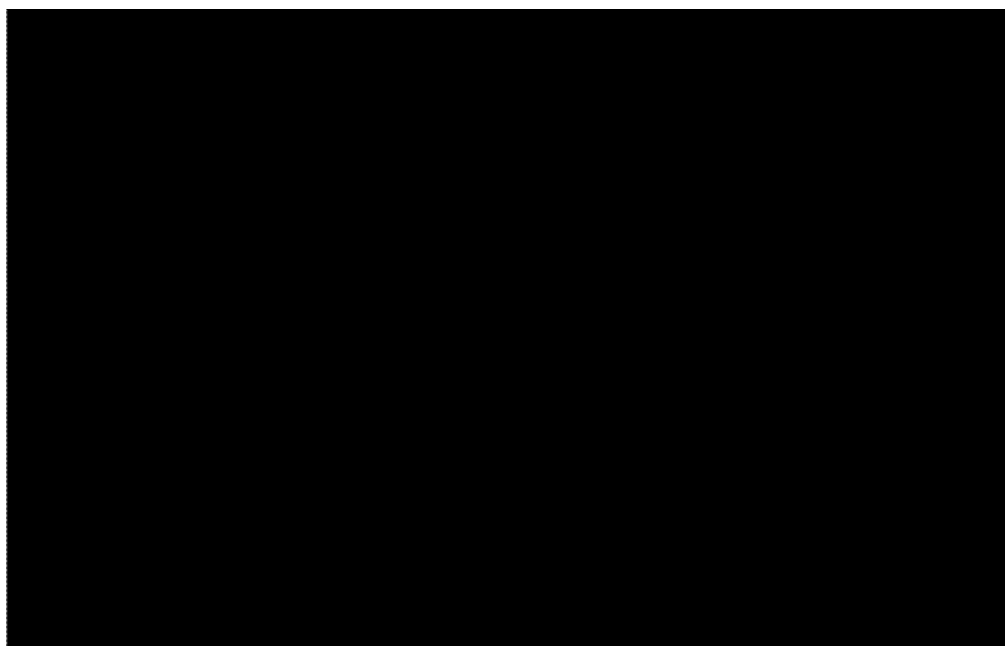
Slika 46. Grafički prikaz rezultata ispitivanja za uzorak B1 s glycolom kao kontaktnim sredstvom

B2 (voda)

Rezultati ispitivanja za uzorak B2 (beton) s vodom kao kontaktnim sredstvom prikazani su u tablici 16, a grafički prikazani na slici 47.

Tablica 16. Rezultati ispitivanja za uzorak B2 s vodom kao kontaktnim sredstvom

Broj mjerjenja	B2 (ispitivanje 1)		B2 (ispitivanje 2)		B2 (ispitivanje 3)	
	e	λ	e	λ	e	λ
	[W√s/m ² K]	[W/mK]	[W√s/m ² K]	[W/mK]	[W√s/m ² K]	[W/mK]
1	1730	1,58	1725	1,57	1767	1,64
2	1756	1,62	1734	1,58	1754	1,62
3	1772	1,65	1740	1,59	1764	1,64
4	1774	1,65	1744	1,60	1760	1,63
5	1771	1,65	1747	1,61	1762	1,63
6	1777	1,66	1737	1,59	1760	1,63
<i>Srednja vrijednost</i>	1763,33	1,64	1737,83	1,59	1761,17	1,63
<i>Standardna devijacija</i>	17,88	0,03	7,83	0,01	4,40	0,01
<i>Koeficijent varijacije</i>	1,01	1,85	0,45	0,89	0,25	0,46



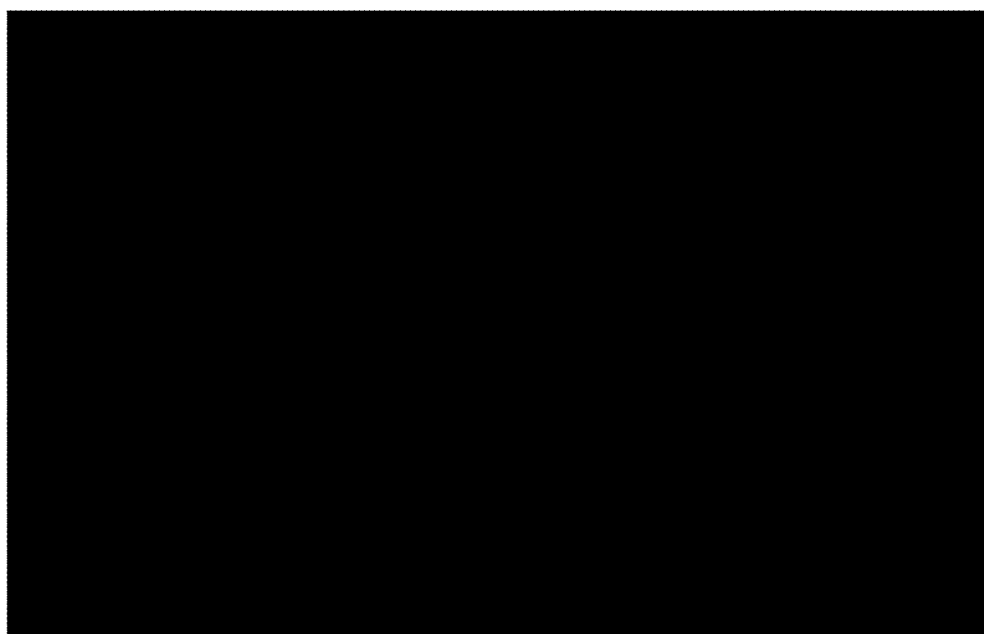
Slika 47. Grafički prikaz rezultata ispitivanja za uzorak B2 s vodom kao kontaktnim sredstvom

B2 (glycol)

Rezultati ispitivanja za uzorak B2 (beton) s glycolom kao kontaktnim sredstvom prikazani su u tablici 17, a grafički prikazani na slici 48.

Tablica 17. Rezultati ispitivanja za uzorak B2 s glycolom kao kontaktnim sredstvom

Broj mjerjenja	B2 (ispitivanje 1)		B2 (ispitivanje 2)		B2 (ispitivanje 3)	
	e	λ	e	λ	e	λ
	[W√s/m ² K]	[W/mK]	[W√s/m ² K]	[W/mK]	[W√s/m ² K]	[W/mK]
1	1638	1,42	1468	1,12	1537	1,24
2	1606	1,36	1452	1,10	1461	1,11
3	1616	1,38	1468	1,12	1437	1,13
4	1622	1,39	1470	1,13	1489	1,16
5	1617	1,38	1468	1,12	1492	1,16
6	1622	1,39	1481	1,15	1490	1,16
<i>Srednja vrijednost</i>	1620,167	1,386667	1467,833	1,123333	1484,333	1,16
<i>Standardna devijacija</i>	10,51507	0,019664	9,261029	0,01633	33,67888	0,044272
<i>Koeficijent varijacije</i>	0,65	1,42	0,63	1,45	2,28	3,82



Slika 48. Grafički prikaz rezultata ispitivanja za uzorak B2 s glycolom kao kontaktnim sredstvom

7.1.4. Opeka

O1 (bez kontaktnog sredstva)

Ispitujući uzorak O1, puna opeka gustoće $1831,8 \text{ kg/m}^3$ na uređaju za mjerenje toplinske provodljivosti "Mathis TCI", korištenjem kalibracijskih krivulja za keramiku, dobiveni su rezultati prema tablici 18.

Tablica 18. Rezultati ispitivanja uzorka O1, bez kontaktnog sredstva

Broj mjerenja	Efuzivnost [$\text{W}\sqrt{\text{s}}/\text{m}^2\text{K}$]	Toplinska provodljivost [W/mK]	Difuzivnost [m^2/s]	Specifični toplinski kapacitet [J/kgK]	1/m
1	362,30	-0,58	2,55e-6	-123,81	67,15
2	363,80	-0,58	2,51e-6	-125,26	67,23
3	366,20	-0,57	2,45e-6	-127,68	67,36
4	366,50	-0,57	2,44e-6	-127,97	67,38
5	368,50	-0,57	2,39e-6	-130,09	67,49
6	368,70	-0,57	2,39e-6	-130,27	67,50
<i>Srednja vrijednost</i>	366,00	-0,57	2,5e-6	-127,51	67,35
<i>Standardna devijacija</i>	2,54	0,01	6,4e-8	2,58	0,14
<i>Koeficijent varijacije</i>	0,69	-0,02	2,56	-0,02	0,21

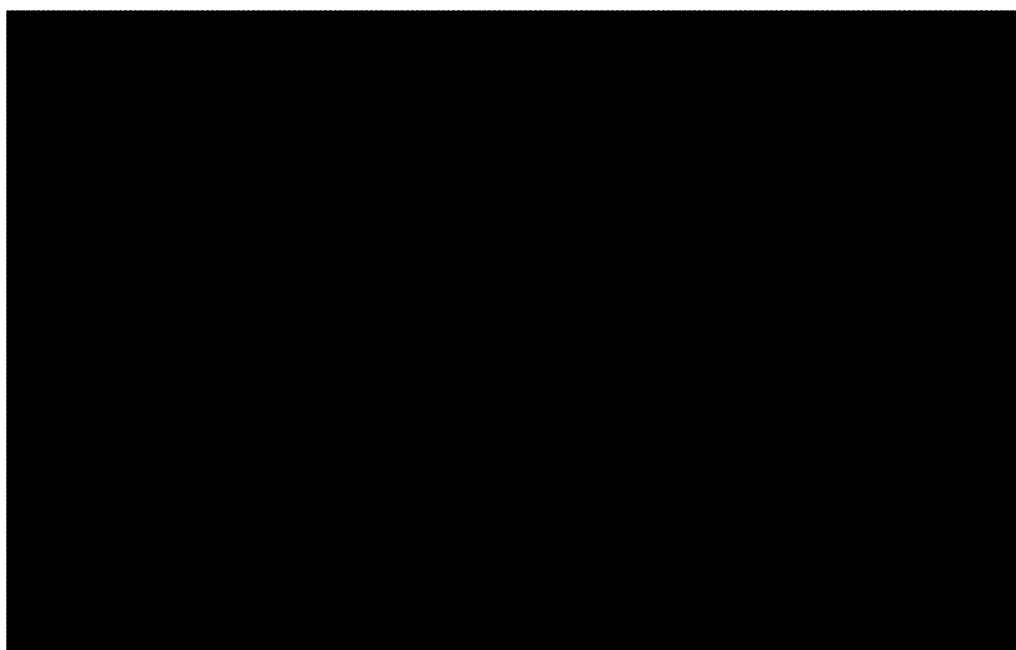
Iz tablice 18 vidljivo je da je dobivena vrijednost toplinske provodljivosti negativna, kao i vrijednost specifičnog toplinskog kapaciteta, što nije moguće. Potrebno je provesti korekciju kalibracijske krivulje, što je detaljnije opisano u poglavlju 7.3.

7.1.5. Ytong

Uzorak ytonga ispitivan je samo u suhom stanju i bez kontaktnog sredstva. Rezultati ispitivanja za prikazani su u tablici 19, a grafički na slici 49.

Tablica 19. Rezultati ispitivanja suhog uzorka ytonga bez kontaktnog sredstva

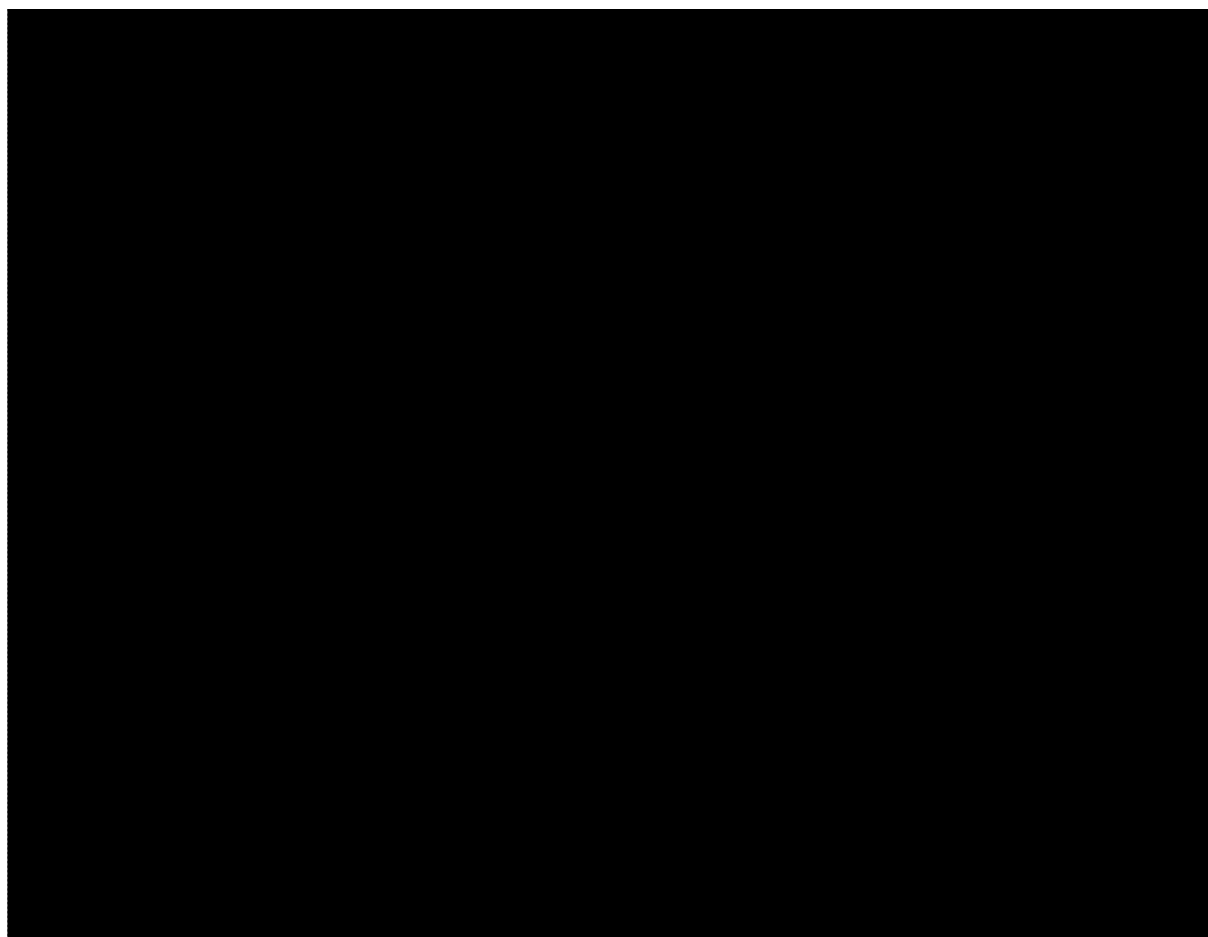
Broj mjerjenja	B2 (ispitivanje 1)		B2 (ispitivanje 2)		B2 (ispitivanje 3)	
	e [W√s/m ² K]	λ [W/mK]	e [W√s/m ² K]	λ [W/mK]	e [W√s/m ² K]	λ [W/mK]
1	151	0,08	105	0,06	196	0,1
2	121	0,07	99	0,06	194	0,09
3	124	0,07	97	0,06	197	0,1
4	126	0,07	98	0,06	196	0,1
5	129	0,07	98	0,06	198	0,1
6	124	0,07	98	0,06	197	0,1
<i>Srednja vrijednost</i>	129,17	0,07	99,17	0,06	196,33	0,10
<i>Standardna devijacija</i>	11,02	0,01	2,93	0,00	1,37	0,01
<i>Koeficijent varijacije</i>	8,53	5,70	2,95	0,00	0,70	4,15



Slika 49. Grafički prikaz rezultata ispitivanja suhog uzorka ytonga bez kontaktnog sredstva

7.2. UTJECAJ KONTAKTNOG SREDSTVA NA ISPITIVANA SVOJSTVA MATERIJALA

Uzorak **opeke O1** ispitivan je uz korištenje glycola i glycerina kao kontaktnih sredstava te bez korištenja kontaktnog sredstva. Na slici 50 prikazane su srednje vrijednosti rezultata tri ispitivanja uz pripadna standardna odstupanja rezultata ispitivanja.



Slika 50. *Rezultati ispitivanja opeke s upotrebom različitih kontaktnih sredstava*

Vidljivo je da ovisno o kontaktnom sredstvu postoji velika razlika u izmjenjenim vrijednostima toplinske provodljivosti što je posljedica kalibracijskih krivulja koje se koriste prema preporuci proizvođača uređaja. Rasipanje rezultata ispitivanja ovisi o vrsti kontaktnog sredstva koje se koristi, odnosno sposobnosti materijala da ga upije. Zbog navedenog je potrebno poznavati kalibracijske krivulje za svako kontaktno sredstvo koje se koristi pri ispitivanju, odnosno korigirati kalibracijske krivulje za svaki slučaj ispitivanja. Primjer korekcije kalibracijske krivulje dan je u poglavlju 7.3.

7.3. KOREKCIJA KALIBRACIJSKE KRIVULJE ZA OPEKU

Ispitivanjem uzoraka opeke O1 dobiveno je veliko odstupanje vrijednosti toplinske provodljivosti i specifičnog toplinskog kapaciteta od literaturnih podataka. Budući da je očekivana toplinska provodljivost pune opeke bila $\lambda = 0,76$ [W/mK] koristile su se kalibracijske krivulje za keramiku, tablica 20 [38]. Prilikom spomenutog mjerenja korištene su kalibracijske krivulje za efuzivnost i toplinsku provodljivost koje proizvođač preporučuje (u slučaju ispitivanja opeke korištene su kalibracijske krivulje za keramiku).

Tablica 20 Preporuke „Mathis Tci“ za odabir kalibracijskih krivulja [38]

Grupa materijala	Efuzivnost [W√s/m ² K]	Toplinska provodljivost [W/mK]
<i>Tekućine i praškasti materijali</i>	0 – 1660	0,00 - 0,60
<i>Pjene</i>	50 – 200	0,04 – 0,09
<i>Kompozitni i keramički materijali</i>	500 – 3000	0,20 – 4,00
<i>Metali</i>	4500 - 19000	6,00 – 110,00

Očito je da se prikazani rezultati ne mogu uzeti kao relevantni, odnosno da mjerenje nije mjerodavno, pokušala su se napraviti mjerenja na istom uzorku pune opeke, ali koristeći kalibracijske krivulje za pjene i za kompozitni materijal (tablica 21).

Tablica 21. Srednje vrijednosti rezultata ispitivanja pune opeke korištenjem kalibracijskih krivulja za pjene i kompozitne materija

Kalibracijske krivulje	Efuzivnost [W√s/m ² K]	Toplinska provodljivost [W/mK]	1/m
<i>Pjena</i>	497	0,3	66,11
<i>Polimer</i>	322,4	0,03	65,88
<i>Keramika</i>	366	-0,57	67,35
<i>Srednja vrijednost</i>	395,13	-0,08	66,45
<i>Standardna devijacija</i>	90,87	0,45	0,79
<i>Koeficijent varijacije</i>	23,00	-562,5	1,19

Iz rezultata ispitivanja prikazanih u tablici 21 vidljivo je da bez obzira koje se kalibracijske krivulje koriste, parametar se $1/m$ uvijek dobiva približno jednak 66,45 sa standardnom devijacijom 0,79. Ovo je razumljivo ako se zna kako uređaj "Mathis TCI" zapravo funkcionira, a što je opisano u poglavlju 6.2.

Zbog svega navedenog, pokušalo se napraviti nove kalibracijske krivulje, odnosno korigirati postojeću kalibracijsku krivulju za keramiku, koje bi za mjerenu vrijednost parametra $1/m$ dale vrijednost efuzivnosti i toplinske provodljivosti prema literaturi ($\lambda = 0,76$ W/mK) [6]. Prilikom toga slijedio je postupak opisan u daljnjem tekstu.

Iz literature [6] za punu opeku gustoće $\rho = 1800$ kg/m³ uzete su vrijednosti toplinske provodljivosti $\lambda = 0,76$ W/mK i specifičnog toplinskog kapaciteta $c = 920$ J/kgK.

Efuzivnost je izračunata prema jednadžbi (14), za navedene literaturne podatke pripadna vrijednost efuzivnosti iznosi: $e = 1121,86$ Ws^{1/2} / m² K .

Kalibracijska krivulja za efuzivnost, prema proizvođaču "Mathis TCI" [38] ima oblik:

$$\frac{1}{m} = M_2 e_2^2 + M_1 e_2 + C \quad (32)$$

pri čemu su:

- M_1, M_2 - konstante senzora,
- C - konstanta ovisna o senzoru i temperaturi okolnog prostora.

Parametar C se računa prema izrazu:

$$C = C_0 + C_1 \cdot T + C_2 \cdot T^2 \quad (33)$$

Pri čemu su:

- C_0, C_1, C_2 - konstante senzora,
- T - temperatura okoliša.

Sve navedene konstante dobivene su od strane proizvođača i prikazane su u tablici 7 u poglavlju 6.2.

Tijekom ispitivanja temperatura okoliša je bila $T = 23,7$ °C, pa vrijednost parametra C , uvažavajući tablicu 7 i izraz (33) iznosi $C = 47,37896$. Prema tome, kalibracijska krivulja koja je definirana od proizvođača za keramičke materijale ima oblik kako slijedi:

$$\frac{1}{m} = 0,0000019 \cdot e_2^2 + 0,05309609 \cdot e_2 + 47,37896 \quad (34)$$

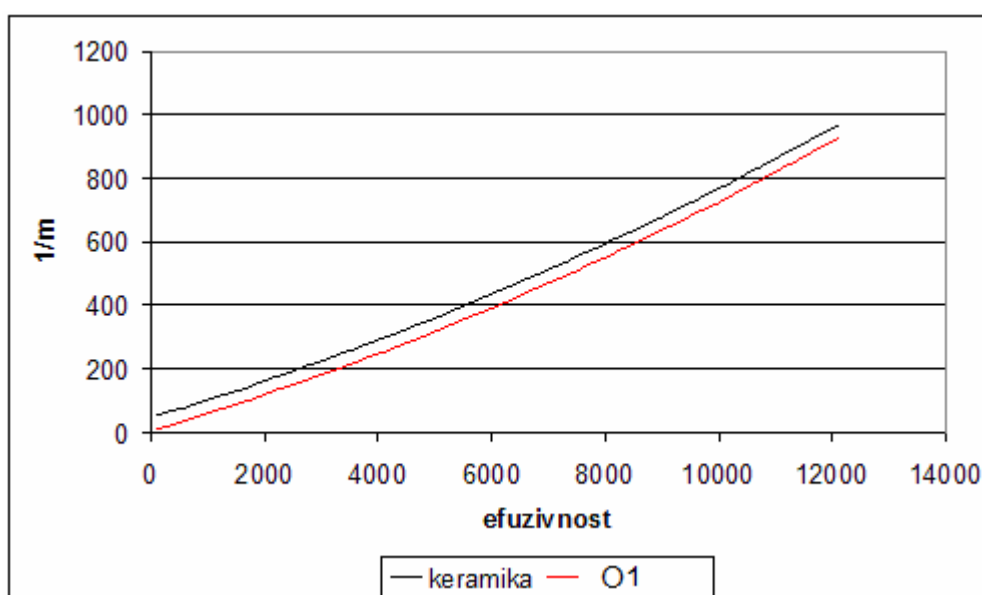
Kako su vrijednosti parametara M_1 i M_2 konstantne za senzor kojim su provedena mjerenja, a i bilo je potrebno zadržati isti oblik krivulje (krivulja za keramički materijal), izračunata je

vrijednost parametra C tako da se dobije ovisnost efuzivnosti i parametra $1/m$, uz uvjet da se za izmjerenu vrijednost $1/m = 66,45$ dobije vrijednost efuzivnosti $e = 1121,86 \text{Ws}^{1/2} / \text{m}^2 \text{K}$.

Vrijednost parametra C tada za navedene uvjete iznosi $C = 5,54234$, a kalibracijska krivulja ima oblik kako slijedi:

$$\frac{1}{m} = 0,0000019 \cdot e_2^2 + 0,05309609 \cdot e_2 + 4,49234 \quad (35)$$

Usporedba kalibracijske krivulje za efuzivnost za keramičke materijale definirane od proizvođača i korigirane kalibracijske krivulje za ispitivanu punu opeku, uz prethodno opisane uvjete prikazana je na slici 51.



Slika 51. Usporedba kalibracijskih krivulja

Kalibracijska krivulja za toplinsku provodljivost, prema proizvođaču "Mathis TCI" [38] ima oblik:

$$\frac{1}{m - m^*} = k \cdot \lambda + y, \quad (36)$$

što također možemo pisati u obliku:

$$\lambda = \frac{\frac{1}{m - m^*} - y}{k} \quad (37)$$

Gdje je:

- m^* - iteracijski algoritam za kalibraciju i računanje λ ,

- y - odsječak kalibracijske krivulje (pravca) na osi $\frac{1}{m - m^*}$
- k - nagib kalibracijske krivulje.

Dakle, λ se određuje na osnovu mjerenja efuzivnosti, i parametra m^* čija se vrijednost određuje kalibriranjem za pojedini senzor i materijal.

Vrijednosti parametara k , y i m^* za senzor kojim je provedeno ispitivanje i za keramičke materijale prikazane su u tablici 7.

Prema tome, kalibracijska krivulja koja je definirana od proizvođača za keramičke materijale ima oblik kako slijedi:

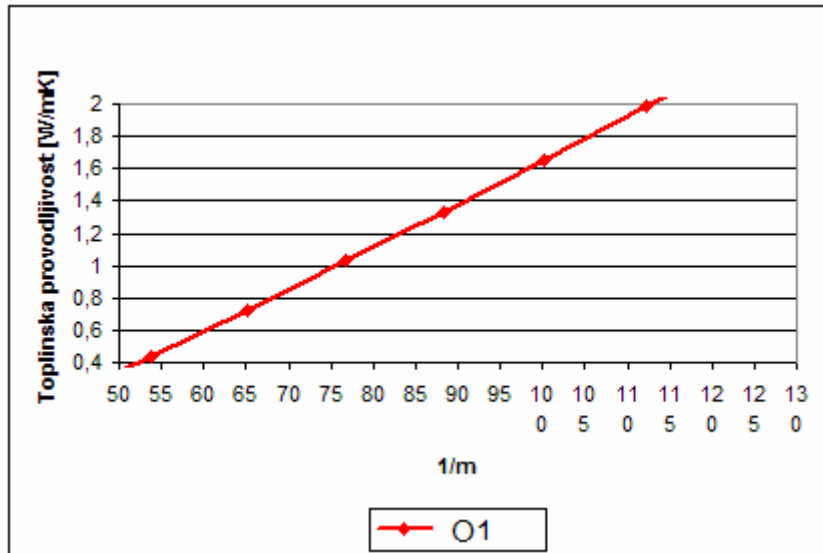
$$\lambda = \frac{\frac{1}{m - 0,000821} - 96,15176}{43,52218}$$

Kako bi se napravila korekcija ove kalibracijske krivulje, odlučilo se da se nagib k i vrijednost parametra m^* zadrže jednake kao i kod krivulje za keramičke materijale, a vrijednost odsječka y je izračunata tako da se za izmjerenu vrijednost $1/m = 66,45$ dobije toplinska provodljivost $\lambda = 0,76 \text{ W/mK}$.

Vrijednost parametra y tada za navedene uvjete iznosi $y = \mathbf{38,38328}$, a kalibracijska krivulja ima oblik kako slijedi:

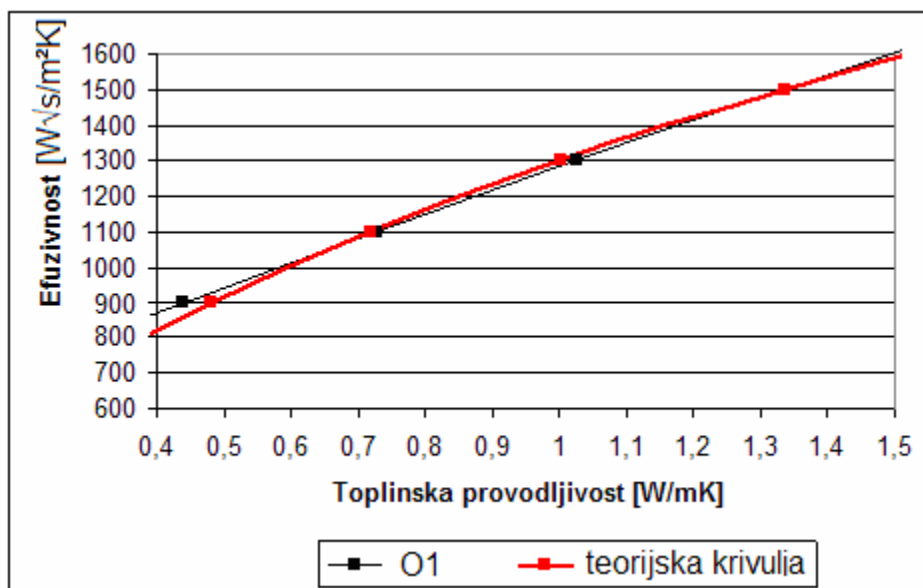
$$\lambda = \frac{\frac{1}{m - 0,000821} - 37,20754}{43,52218}$$

Na slici 52 je prikazana ovisnost parametra toplinske provodljivosti i $1/m$ za očekivano područje vrijednosti toplinske provodljivosti $[0,4 - 2,0 \text{ W/mK}]$, odnosno korigirana kalibracijska krivulja koja vrijedi za ispitivanje pune opeke uz prethodno opisane uvjete.



Slika 52. Odnos toplinske provodljivosti i $1/m$

Na slici 53 prikazan je odnos efuzivnosti i toplinske provodljivosti za punu opeku čija je gustoća $\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$ i čiji je specifični toplinski kapacitet $c = 920 \text{ J/kgK}$, izračunata prema jednadžbi (14) u usporedbi s ovisnosti između efuzivnosti i toplinske provodljivosti dobivene iz korigiranih kalibracijskih krivulja.



Slika 53. Odnos efuzivnosti i toplinske provodljivosti

Sa slike 53 je vidljivo da u području vrijednosti toplinske provodljivosti od 0,4 – 1,5 W/mK u kojem se mogu očekivati rezultati ispitivanja za punu opeku nema velikih odstupanja u dobivenim rezultatima.

Tako je za vrijednost efuzivnosti $e = 1121,86 \text{ W s}^{1/2} / \text{m}^2 \text{K}$, za punu opeku dobivenu iz literaturnih podataka, vrijednost toplinske provodljivosti $\lambda = 0,76 \text{ W/mK}$, a za ispitivanu opeku gustoće $1831,8 \text{ kg/m}^3$ vrijednost toplinske provodljivosti $\lambda = 0,747 \text{ W/mK}$.

7.4. ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA GRAĐEVNIH MATERIJALA

Uzorci mramora, granita, betona, ytonga i pune opeke gustoće ispitivani su uređajem "Mathis TCi" u uvjetima prikazanim u tablici 8. Prilikom ispitivanja korištena su 3 načina prijanjanja uzoraka, koji su proizašli iz ponašanja uzoraka prilikom ispitivanja. Podaci o vrijednostima toplinske provodljivosti uzeti iz literature [4], te srednje vrijednosti izmjerene toplinske provodljivosti za pojedini uzorak dani su u tablici 22.

Tablica 22. Usporedba rezultata ispitivanja

Uzorak	Vrijednost λ iz literature [W/mK]	Srednja vrijednost λ za ispitivanje 1 voda/glycol [W/mK]	Srednja vrijednost λ za ispitivanje 2 voda/glycol [W/mK]	Srednja vrijednost λ za ispitivanje 3 voda/glycol [W/mK]	Srednja vrijednost za ispitivanja 1, 2 i 3 [W/mK]
B1	1,150	0,69	0,50	0,71	0,63
M1	3,500	1,94	1,11	2,10	1,71
G1	2,800	2,41	2,49	2,19	2,36
ytong	0,115	0,07	0,06	0,10	0,077
B2	-	1,64 / 1,39	1,59 / 1,12	1,63 / 1,16	1,62 / 1,22
M2	-	3,30 / 2,78	3,38 / 2,71	3,33 / 2,65	3,34 / 2,71
G2	-	2,81 / 2,46	2,88 / 2,66	2,87 / 2,63	2,85 / 2,58

Uzorak mramora ispitivan je u uvjetima laboratorijske vlažnosti od 50,2% i u zasićenom stanju. Vidljivo je da je toplinska provodljivost mramora ispitivanog u laboratorijskim uvjetima 1,71 W/mK. U usporedbi s literaturnim podacima [4], vrijednost toplinske provodljivosti za mramor gustoće $\rho = 2600 \text{ kg/m}^3$ iznosi $\lambda = 2,3 \text{ W/mK}$, što je neznatno viša vrijednost od izmjerene. Razlika se može objasniti razlikom u gustoći, odabirom krivulja kalibracije za keramiku preuzetih od proizvođača i koje su namijenjene za široki raspon materijala. Zasićivanjem uzorka M1 i njegovim ispitivanjem u zasićenom stanju M2 s kontaktnim sredstvom, vodom (poglavlje 7.1.1.) dobivene su vrijednosti toplinske provodljivosti $\lambda = 3,34 \text{ W/mK}$, što je u usporedbi s vrijednostima iz literature viša vrijednost. U slučaju ispitivanja zasićenog uzorka M2 s kontaktnim sredstvom glycolom (opisano u poglavlju 7.1.1.) dobivene su vrijednosti toplinske provodljivosti $\lambda = 2,71 \text{ W/mK}$ što je

također viša vrijednost. Postupkom zasićivanja uzorka dobivena je konstantnost rezultata mjerenja, što potvrđuje činjenicu da je kod suhog uzorka došlo do upijanja kontaktnog sredstva.

Uzorak granita također je ispitivan u uvjetima laboratorijske vlažnosti i u zasićenom stanju. Dobivena je vrijednost toplinske provodljivosti uzorka $\lambda = 2,36 \text{ W/mK}$, što se podudara s vrijednosti iz literature gdje je za granit gustoće $\rho = 2500 - 2700 \text{ kg/m}^3$ dana vrijednost $\lambda = 2,8 \text{ W/mK}$. Razlika se može objasniti razlikama u gustoći uzorka (ispitni uzorak je bio gustoće $\rho = 2849,47 \text{ kg/m}^3$) i odabirom krivulja kalibracije preuzetih od proizvođača. Vidljivo je da vrijednost λ za zasićene uzorke nije značajno veća od one dobivene za laboratorijsku vlažnost (tablica 22). To se objašnjava činjenicom da zbog guste strukture (velike gustoće) uzorak nije upio značajnu količinu vode prilikom zasićenja. Gusta struktura uzorka također objašnjava konstantne vrijednosti toplinske provodljivosti tijekom više mjerenja, dakle nije bilo upijanja kontaktnog sredstva od strane uzorka. Kao i kod mramora, i kod granita može se primijetiti da voda kao kontaktno sredstvo povećava vrijednosti toplinske provodljivosti u odnosu na glycol.

Uzorak betona koji je ispitivan imao je gustoću $\rho = 1728 \text{ kg/m}^3$ i vrijednost toplinske provodljivosti $\lambda = 0,63 \text{ W/mK}$ za laboratorijsku vlažnost i uz upotrebu glycola kao kontaktnog sredstva. Prema podacima iz literature [4] vrijednost λ iznosi $1,15 \text{ W/mK}$. Razlika se može objasniti razlikom u gustoći i odabirom kalibracijskih krivulja, ali u ovom slučaju i postojanjem sloja zraka koji je mogao nastati između senzora i uzorka, a sve zbog vrlo porozne strukture betona te upijanja kontaktnog sredstva. Nakon zasićenja uzorka vrijednosti toplinske provodljivosti ponašaju se kao i kod mramora i granita, velika preciznost u mjerenjima, s time da je λ u slučaju kad je kontaktno sredstvo voda veća, a s glycolom je u ovome slučaju dobivena vrijednost λ vrlo blizu podataka iz literature, tablica 22. U poglavlju 7.2. je prikazan utjecaj kontaktnog sredstva na rezultate ispitivanja toplinske provodljivosti materijala na uzorku opeke O1.

Uzorak ytonga ispitivan je samo u uvjetima laboratorijske vlage i bez kontaktnog sredstva. Rezultati ispitivanja su zadovoljavajući jer je za uzorak gustoće $\rho = 507,82 \text{ kg/m}^3$ dobivena vrijednost toplinske provodljivosti $\lambda = 0,08 \text{ W/mK}$ što je u usporedbi s podatkom iz literature [33] $\lambda = 0,115 \text{ W/mK}$ za $\rho = 500 \text{ kg/m}^3$ vrlo točno ako se uzme u obzir da je uzeta kalibracijska krivulja za pjene koja vrijedi za vrlo široki spektar materijala.

Ispitivanjem opeke, poglavlje 6.5.1., dobiveni su rezultati koji nisu točni, jer je dobivena vrijednost toplinske provodljivosti suhe opeke $\lambda = -0,57 \text{ W/mK}$ i specifični toplinski kapacitet

$c = 127,51 \text{ J/kgK}$, tablica 19. Očekivana vrijednost λ za punu opeku gustoće $\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$ iz literature bila je $\lambda = 0,76 \text{ W/mK}$ [4]. Pogrešan odabir kalibracijske krivulje rezultirao je i netočnosti rezultata mjerenja. Zbog toga, nedovoljno prikladna krivulja kalibracije za određeni uzorak predstavlja problem koji je potrebno ispraviti. Zbog toga se pristupilo postupku opisanom u poglavlju 7.3., odnosno korigiralo se kalibracijske krivulje dobivene od proizvođača ("Mathis TCi") čime je dobivena korigirana kalibracijska krivulja za punu opeku. Dobiveni su rezultati toplinske provodljivosti $\lambda = 0,747 \text{ W/mK}$ što je greška od 1,7% u odnosu na vrijednost iz literature.

7.5. REZULTATI ISPITIVANJA CEMENTNE PASTE "MATHIS TCI" UREĐAJEM

Metodom vrućeg diska ispitivana je promjena vrijednosti toplinskog kapaciteta, toplinske provodljivosti i efuzivnosti hidratizirajuće cementne paste u svježem stanju i za vrijeme trajanja hidratacije od jednog dana pri temperaturi okoliša od 22 °C i 34% vlažnosti zraka.

Pripremljeni su uzorci od cementa CEM I, vodocementnog omjera $v/c = 0,3$ i $v/c = 0,4$. Voda i cement miješani su prema normi HRN EN 196: 2005. Nakon miješanja uzorci cementne paste stavljeni su u kalup i obavijeni polietilenom male gustoće u svrhu zaštite senzora od svježe cementne paste čime se omogućilo kontinuirano mjerenje toplinskih svojstava. Uzorci cementne paste su pripremljeni vibriranjem da se uklone mjehurići zraka u samoj cementnoj pasti te u kontaktu između cementne paste u polietilenskoj foliji i senzora. Određena je gustoća uzoraka u svježem stanju. Mjerenja su se obavljala u laboratoriju na temperaturi od 22 °C gdje su očvršćivali.

Koristeći poznatu vrijednost toplinskog kapaciteta vode (4,18 J/(gK) pri temperaturi od 23 °C) i cementnog praha (baziranu na mjerenim vrijednostima za trikalcij silikat i dikalcij silikat [24]), toplinski kapacitet za svježju cementnu pastu pri temperaturi od 23°C može se dobiti koristeći jednostavni zakon mješavine prema izrazu:

$$C_p^{(svježa\ pasta)} = 4,18 M_f^{voda} + 0,75M_f^{cem} \quad (37)$$

Gdje je:

- M_f^{voda} - maseni udio vode u svježjoj pasti,
- M_f^{cem} - maseni udio cementnog praha

$$\rightarrow M_f^{cem} = (1 - M_f^{voda})$$

$$\rightarrow C_p^{(svježa\ pasta)} = 0,75 + 3,43M_f^{vode} \quad (38)$$

Za $v/c = 0,3$ maseni udio vode u ukupnoj masi mješavine iznosi $M_f^{voda} = 0,3/1,3=0,231$ dok je za $v/c = 0,4$ maseni udio vode u ukupnoj masi mješavine iznosi $M_f^{voda} = 0,4/1,4=0,286$.

Uvrštavanjem u izraz (38) dobivena je teorijska vrijednost specifičnog toplinskog kapaciteta cementne paste u svježem stanju, kako je prikazano u tablici 23.

Tablica 23. Specifični toplinski kapacitet za vodocementne omjere 0,3 i 0,4

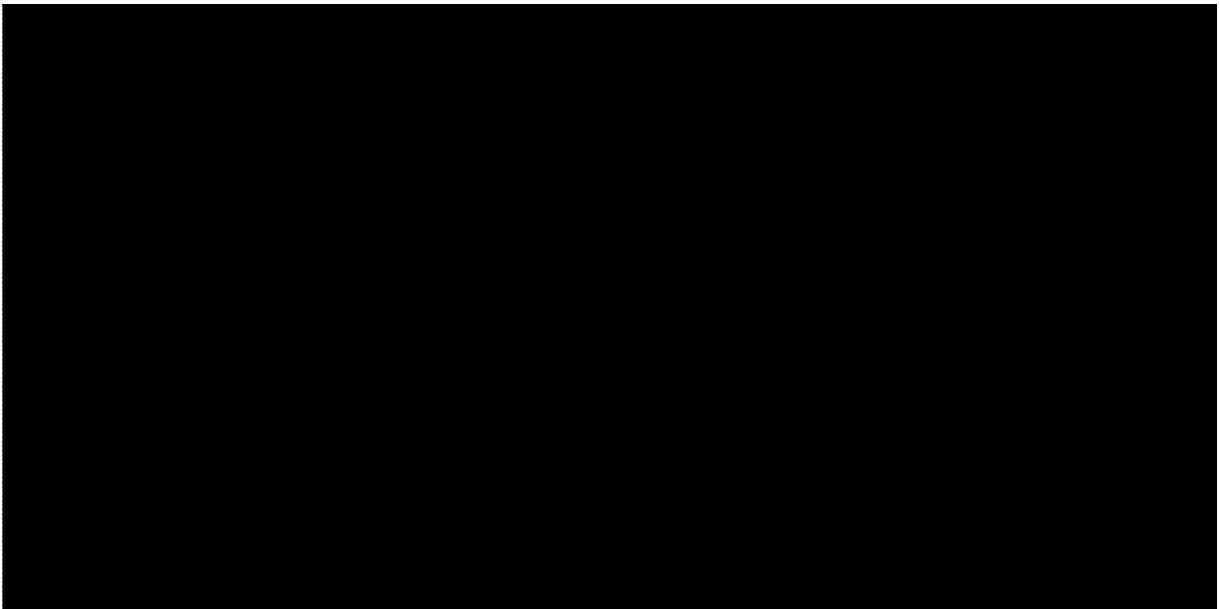
v/c	C_p [J/gK]
0,3	1,54
0,4	1,73

7.5.1. Cementna pasta $v/c = 0,3$

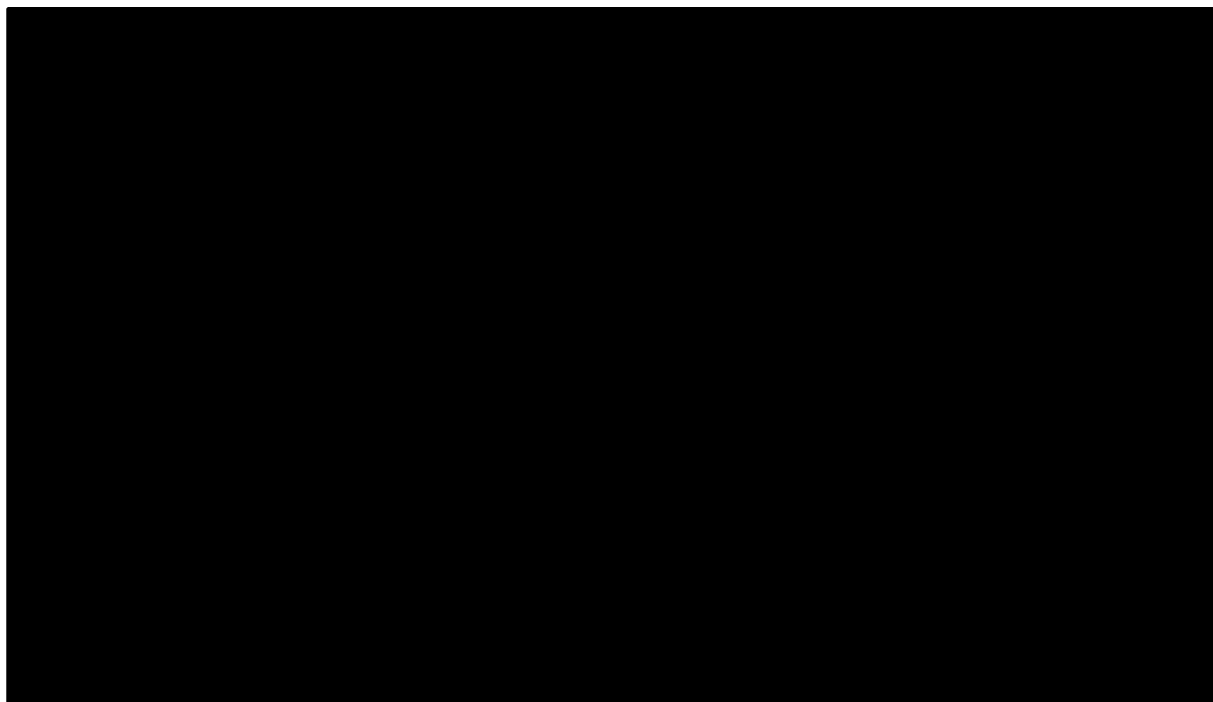
Mjerenjem cementne paste $v/c = 0,3$ uređajem Mathis Tci, dobivene su promjene toplinskih svojstava cementne paste kako je prikazano na slikama 54 - 59.



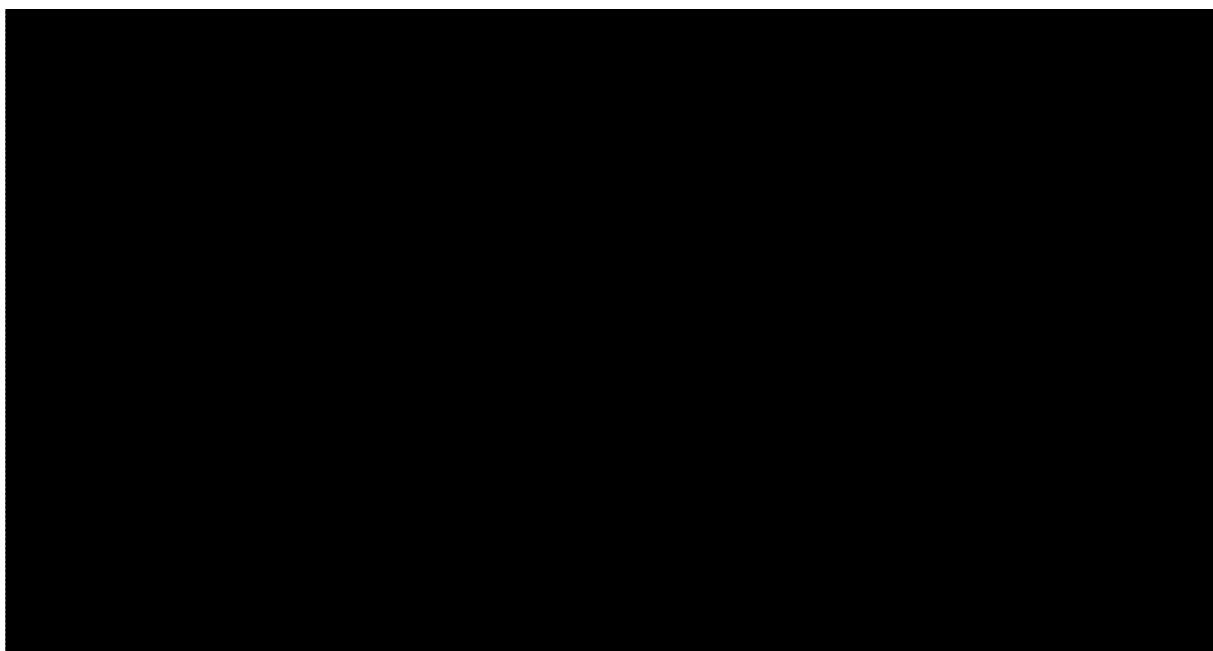
Slika 54. *Promjena toplinske provodljivosti cementne paste $v/c = 0,3$*



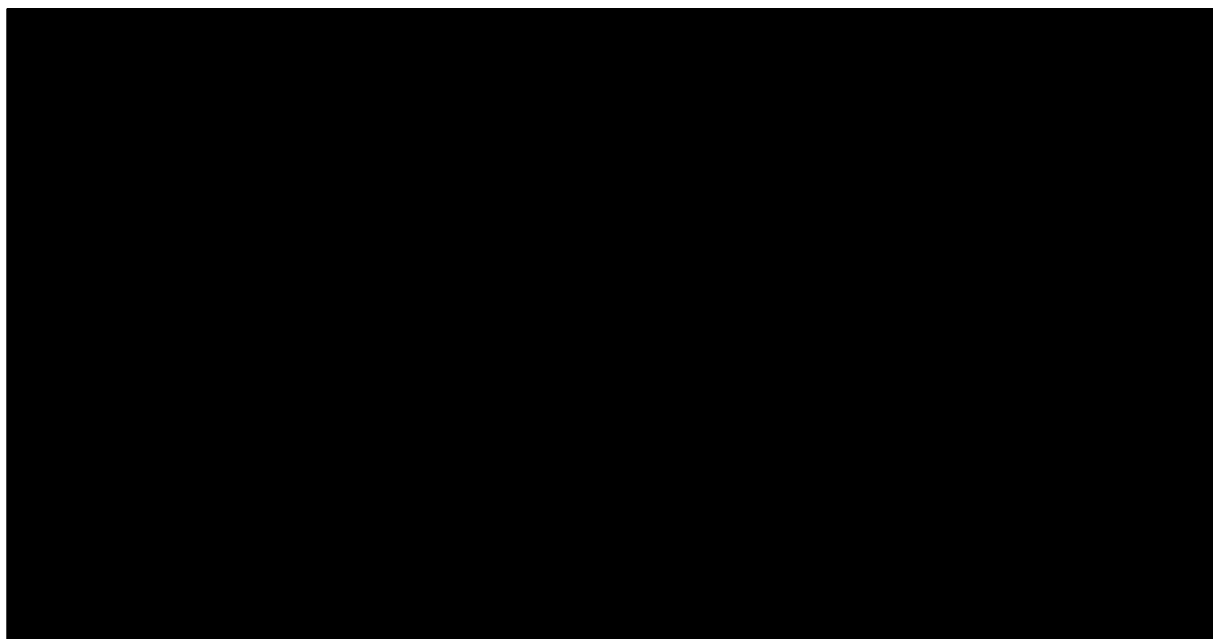
Slika 55. *Relativna promjena toplinske provodljivosti cementne paste $v/c = 0,3$*



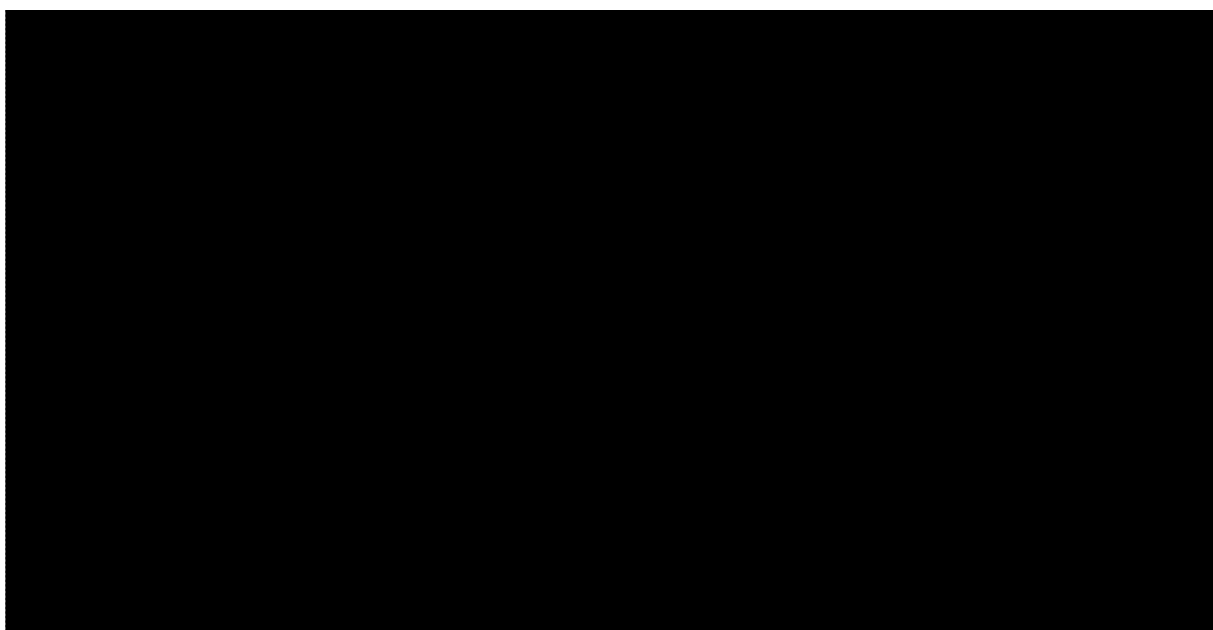
Slika 56. *Relativna promjena specifičnog toplinskog kapaciteta cementne paste $v/c = 0,3$*



Slika 57. *Promjena efuzivnosti cementne paste $v/c = 0,3$*



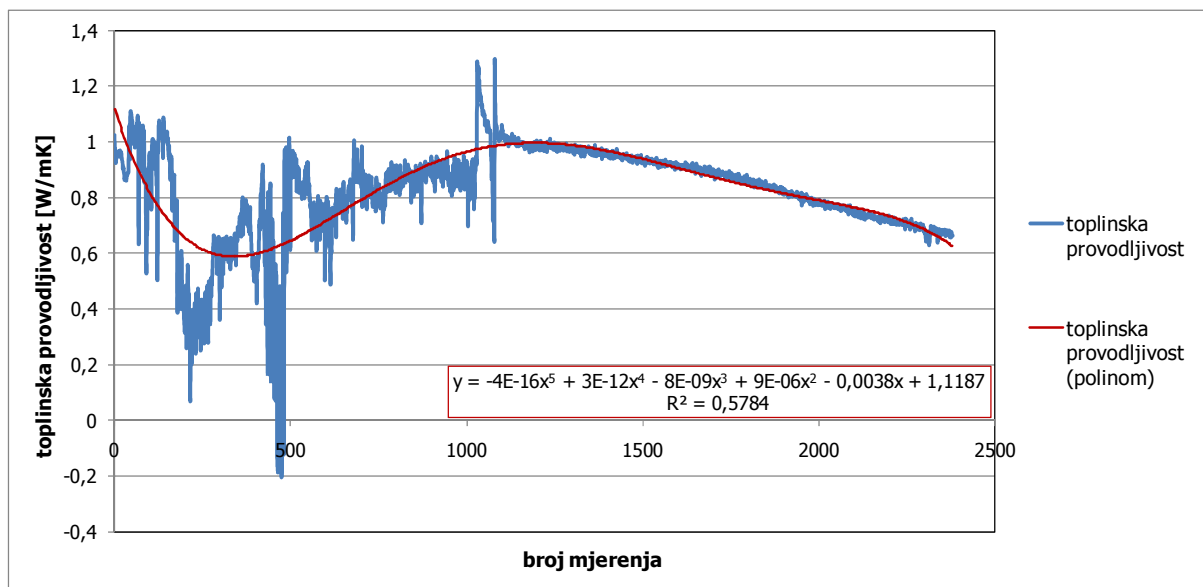
Slika 58. *Relativna promjena efuzivnosti cementne paste $v/c = 0,3$*



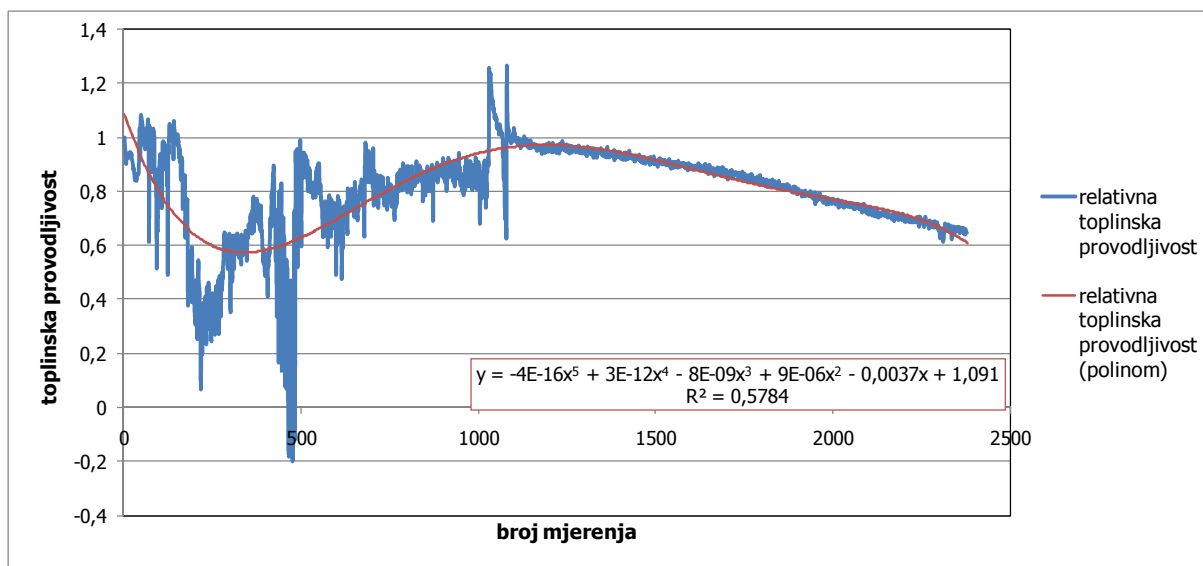
Slika 59. *Promjena $1/m$ cementne paste $v/c = 0,3$*

7.5.2. Cementna pasta $v/c = 0,4$

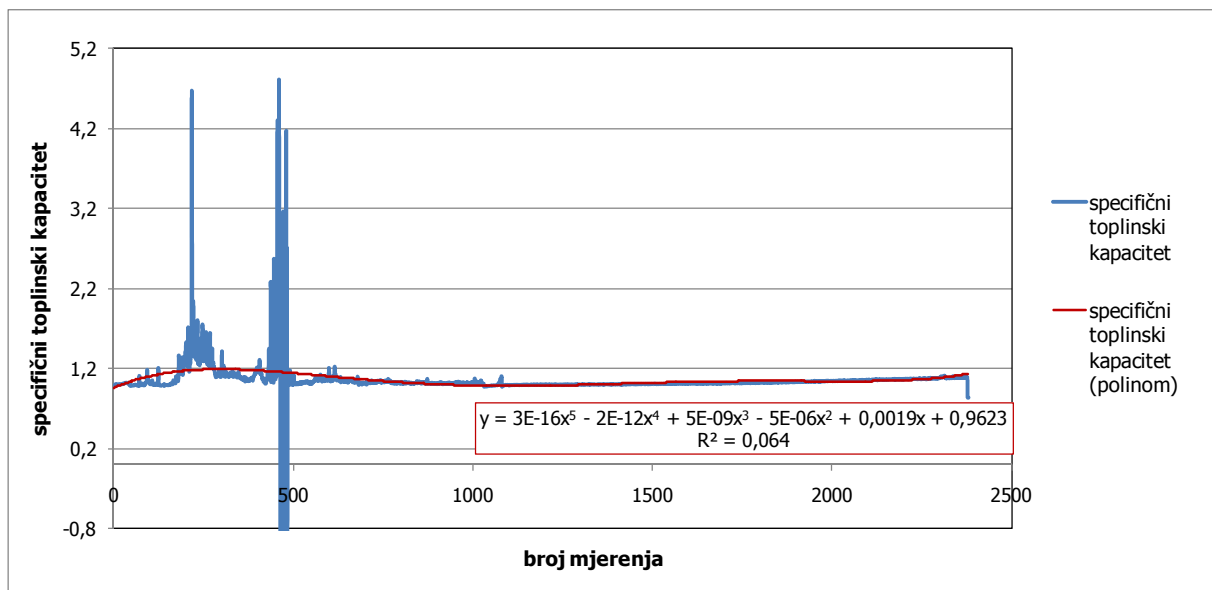
Mjerenjem cementne paste $v/c = 0,4$ uređajem "Mathis TCI", dobivene su promjene toplinskih svojstava cementne paste kako je prikazano na slikama 60 - 65.



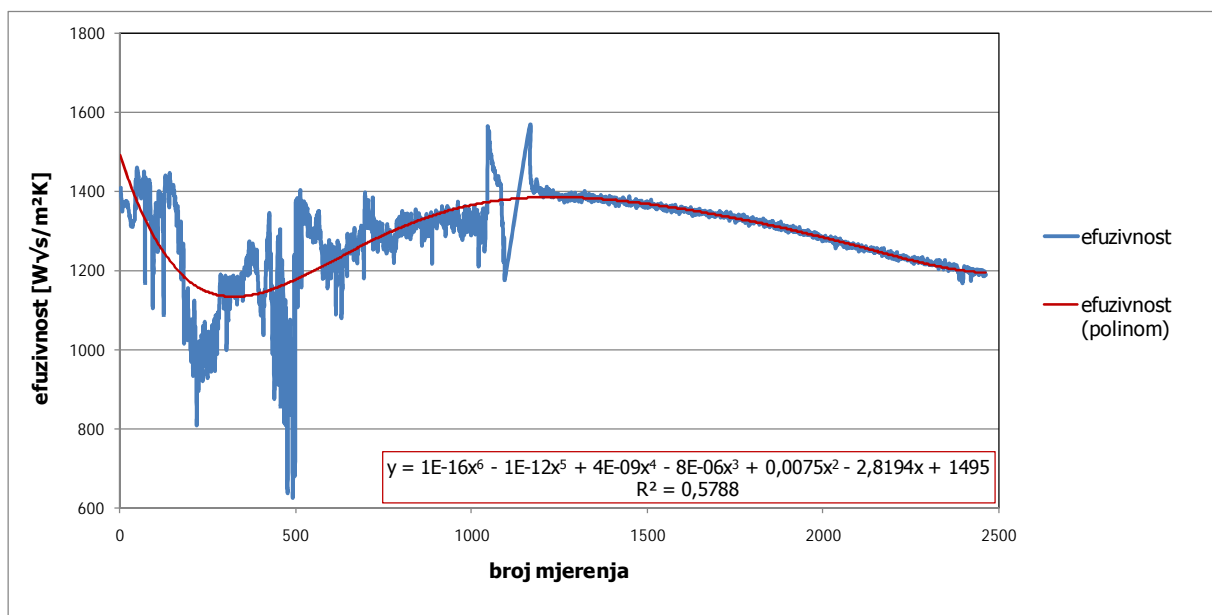
Slika 60. Promjena toplinske provodljivosti cementne paste $v/c = 0,4$



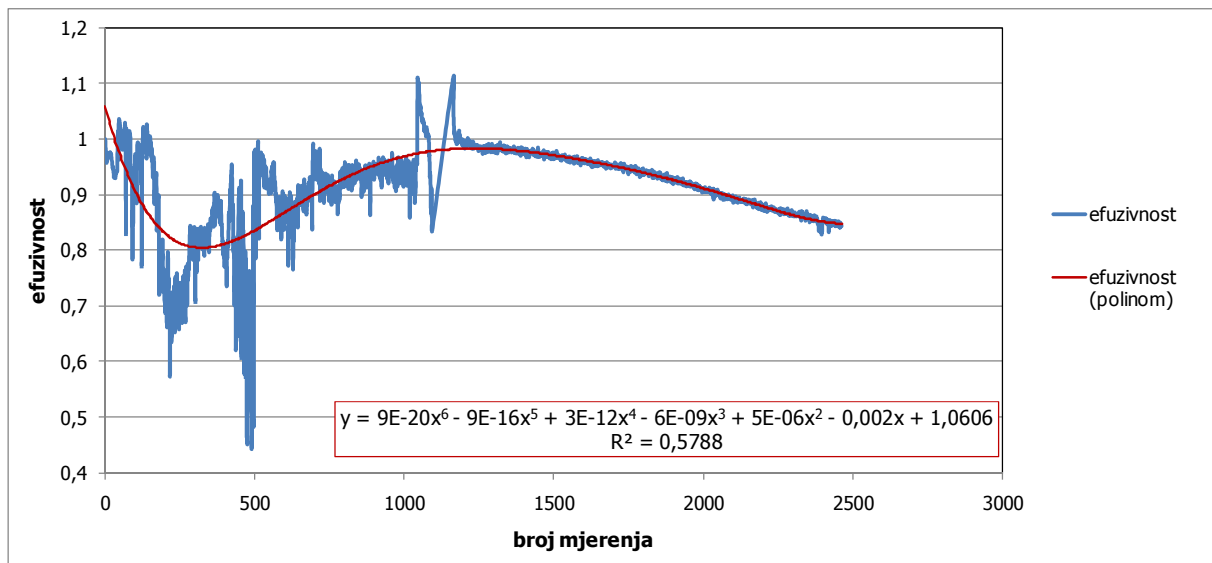
Slika 61. Relativna promjena toplinske provodljivosti cementne paste $v/c = 0,4$



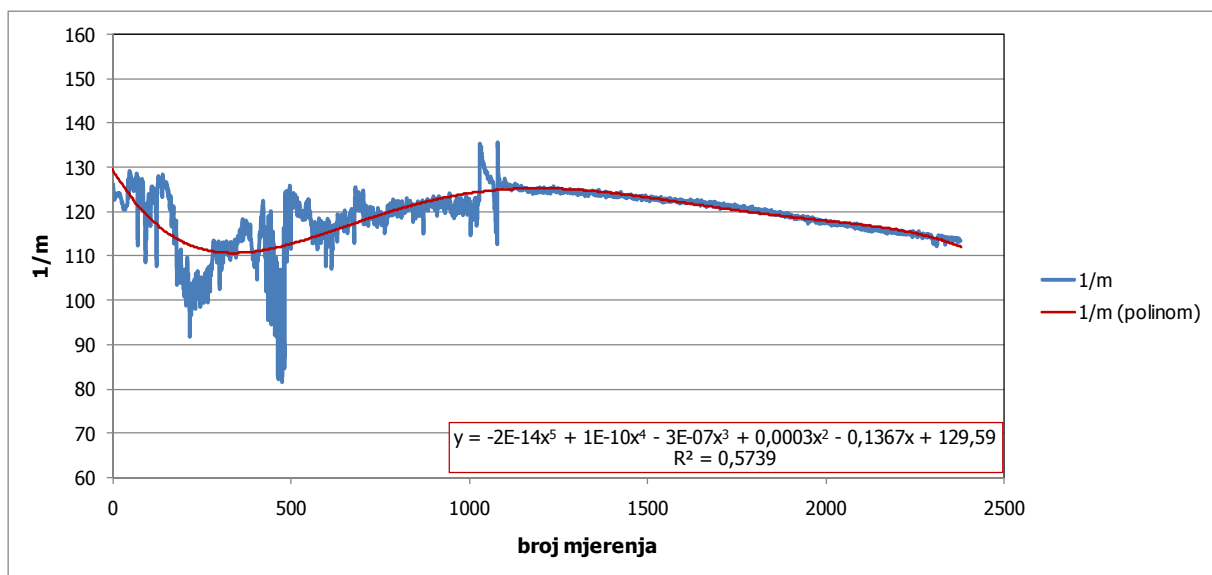
Slika 62. Relativna promjena specifičnog toplinskog kapaciteta cementne paste $v/c = 0,4$



Slika 63. Promjena efuzivnosti cementne paste $v/c = 0,4$



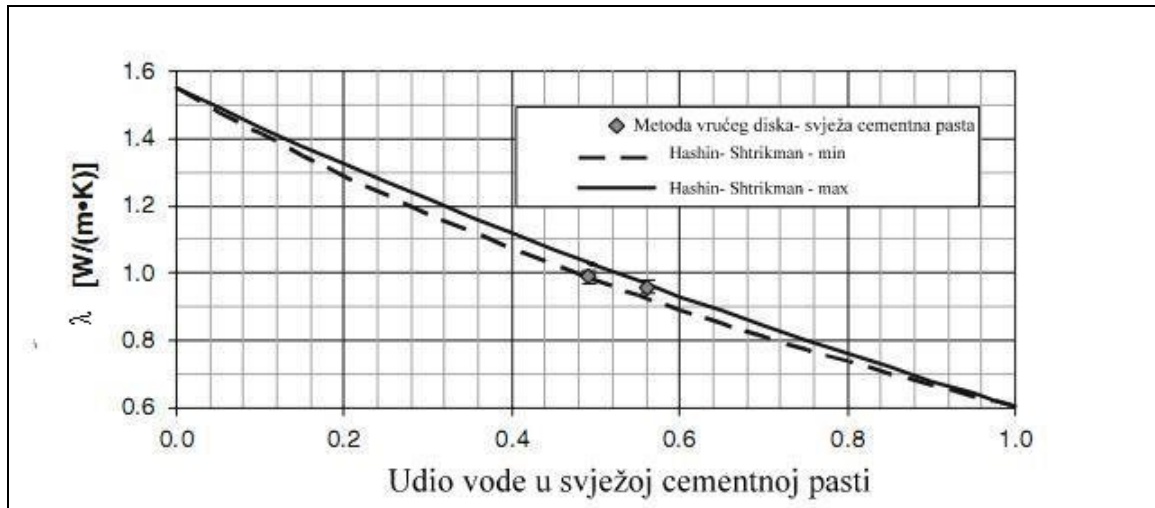
Slika 64. Relativna promjena efuzivnosti cementne paste $v/c = 0,4$



Slika 65. Promjena $1/m$ cementne paste $v/c = 0,4$

7.6. ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA CEMENTNE PASTE

Ispitivanjem toplinskih svojstava cementne paste vodocementnog omjera $v/c = 0,3$ i $v/c = 0,4$ dobivene su vrijednost toplinske provodljivosti u skladu s rezultatima iz literature [24] za toplinsku provodljivost svježe cementne paste, što je vidljivo iz dijagrama prikazanog na slici 66.



Slika 66. Mjerena toplinska provodljivost svježe cementne paste u ovisnosti o početnom vodocementnom omjeru [24, 39, 40]

Za ispitivanje specifičnog toplinskog kapaciteta svježe cementne paste $v/c = 0,3$ i $v/c = 0,4$, kao ulazni podatak, potrebno je unijeti vrijednost gustoće. Pretpostavlja konstantna vrijednost gustoće, u svježem stanju, jer u literaturi ne postoje podaci o načinu određivanja promjene gustoće hidratizirajuće cementne paste u vremenu te je zaključeno da promjena gustoće nema značajnijeg utjecaja na promjenu vrijednosti specifičnog toplinskog kapaciteta. Iz slike 56 vidljivo je da je relativna promjena vrijednosti specifičnog toplinskog kapaciteta za cementnu pastu $v/c = 0,3$ manja od 1 % tijekom mjerenja u trajanju od 4 dana. Za cementnu pastu $v/c = 0,4$, vrijednost specifičnog toplinskog kapaciteta mijenja se također u malim granicama i može se smatrati konstantnom.

Pri ispitivanju efuzivnosti za cementnu pastu $v/c = 0,3$; najznačajnija promjena, prilikom koje dolazi do pada vrijednosti efuzivnosti, odvija se tijekom prvog dana mjerenja. Drugi dan mjerenja efuzivnost dosegne približno konstantnu vrijednost i dalje ne dolazi do značajnijih promjena. Relativna promjena vrijednosti efuzivnosti za cementnu pastu $v/c = 0,3$ je 10 %.

Kod cementne paste $v/c = 0,4$ promjena efuzivnosti je 25 % u prvih 5 sati te naraste na početnu vrijednost nakon jednog dana. (slika 64).

Tijekom ispitivanja cementne paste $v/c = 0,3$ i $0,4$; parametar $1/m$ se mijenja na isti način kao i efuzivnost (slika 59, 65).

Prikazana vrijednost toplinske provodljivosti u ovisnosti o početnom vodocementnom omjeru može se uzeti kao mjerodavna do trenutka u kojem započinje vezivanje.

8. ZAKLJUČAK

Toplinska svojstva građevnih materijala mogu se ispitivati metodom vrućeg diska, uređajem "Mathis TCi". To je brza i jednostavna, ali osjetljiva metoda koja se može upotrebljavati za kontrolu kvalitete u proizvodnji materijala, a uz poznavanje jedinstvenih kalibracijskih krivulja mogu se odrediti i točne vrijednosti toplinskih svojstava građevnih materijala. Utvrđeno je da nije dovoljno koristiti kalibracijske krivulje, prema preporukama proizvođača, koje pokrivaju širok spektar vrijednosti toplinskih svojstava već da je potrebno provesti korekciju kalibracijske krivulje za svaki pojedini materijal.

Utvrđeno je da u formiranoj strukturi hidratizirajuće cementne paste, voda ima velik utjecaj na svojstva cementne paste te da o njoj ovise toplinska svojstva kao što je opisano u poglavlju 3.3. Voda je u hidratizirajućoj cementnoj pasti sadržana u više različitih stanja, a to su: vodena para, slobodna voda, adsorbirana voda, međuslojna voda, kemijski vezana voda. Volumen čvrstih produkata hidratacije je manji od ukupnog volumena cementa i vode prije njihove kemijske reakcije. Budući da nema značajnije promjene ukupnog volumena cementne paste za vrijeme hidratacije, to znači, da će gel tijekom kemijske reakcije upiti vodu iz pora i kapilara, koje su tada ispunjene zrakom. Poroznost je karakteristika koja najbolje reprezentira strukturu hidratizirajuće cementne paste [11]. Početkom procesa hidratacije mješavina anhidritnog portland-cementa i vode počinje se ugušćivati do konačnog skrućivanja. Ugušćivanje je praćeno smanjenjem poroznosti. Reakcije hidratacije teku dok ne ponestane reaktanata ili slobodnog prostora za formiranje hidratacijskih produkata, a to uvjetuje zaustavljanje reakcija [41]. Toplinska provodljivost je funkcija vlažnosti materijala pa smanjenje udjela slobodne vode i povećanje količine pora u kristalnoj strukturi, u koju se cementna pasta pretvara, izravno utječe na smanjenje toplinske provodljivosti materijala [11]. Utjecaj poroznosti očituje se u vrijednosti toplinske provodljivosti zraka ($\lambda_{zraka} = 0,023$ W/mK) u odnosu na vrijednost toplinske provodljivosti vode ($\lambda_{vode} = 0,57$ W/mK).

Napredovanje hidratacije cementa odražava se na razvoj kemijskih svojstva cementne paste ili betona, a poznato je da toplinska provodljivost ovisi o kemijskom sastavu cementne paste.

Zajedničko djelovanje svih navedenih utjecaja uzrokuje promjenu toplinskih svojstava cementne paste tijekom očvršćavanja slika (54, 56)

POPIS SLIKA:

Slika 1. <i>Prijenos topline vođenjem</i>	8
Slika 2. <i>Element duljine d, poprečnog presjeka A omeđena paralelnim ravninama na kojima djeluju temperature T_1 i T_2 [5]</i>	9
Slika 3. <i>Prijenos topline strujanjem</i>	10
Slika 4. <i>Prijenos topline zračenjem</i>	11
Slika 5. <i>Ovisnost toplinske provodljivosti zida od opeke o vlažnosti opeke [2]</i>	1
Slika 6. <i>Potrebna debljina građevnih materijala za postizanje toplinskog otpora od 1,25 m^2K/W [8]</i>	20
Slika 7. <i>Prikaz razvoja topline kroz vrijeme [10, 11, 12]</i>	21
Slika 8. <i>Shematski prikaz hidratacije cementa [11, 12]</i>	22
Slika 9. <i>Faze hidratacije [11, 13]</i>	23
Slika 10. <i>Shematski prikaz metode vrućeg diska [27]</i>	28
Slika 11. <i>Shema eksperimentalne konfiguracije za mjerenje toplinskih svojstava para uzoraka cementne paste (dvostrukog) [24]</i>	28
Slika 12. <i>Izmjereni toplinski kapaciteti hidratizirajuće cementne paste, kao funkcija stupnja hidratacije za očvršćivanje u zasićenim i zabrtvljenim uvjetima [24]</i>	29
Slika 13. <i>Izmjerene vrijednosti toplinske provodljivosti cemente paste kao funkcije stupnja hidratacije [24]</i>	30
Slika 14. <i>Promjena toplinske provodljivosti betona u ovisnosti o vremenu [15]</i>	30
Slika 15. <i>Pönsgenov uređaj sa zaštićenom vrućom pločom - mjerni složaj</i>	32
Slika 16. <i>Pönsgenov uređaj sa zaštićenom vrućom pločom - shematski prikaz</i>	32
Slika 17. <i>Presjek mjernog složaja</i>	34
Slika 18. <i>Principi dinamičkog mjerenja toplinske provodljivosti metodom vruće žice</i>	35
Slika 19. <i>Shematski prikaz metode laserske impulzivne difuzivnosti</i>	36
Slika 20. <i>Ravninska spirala u senzoru</i>	37
Slika 21. <i>Mathis TCi uređaj</i>	38
Slika 22. <i>Shematski prikaz uređaja</i>	39
Slika 23. <i>Senzor</i>	39
Slika 24. <i>Novo ispitivanje</i>	40
Slika 25. <i>Grupa materijala</i>	41
Slika 26. <i>Karakteristike materijala</i>	41

Slika 27. <i>Vrsta ispitivanja</i>	42
Slika 28. <i>Odabir projekta</i>	43
Slika 29. <i>Odabir vrste ispitivanja</i>	43
Slika 30. <i>„Započni ispitivanje“ ("Start test")</i>	44
Slika 31. <i>Početak ispitivanja</i>	44
Slika 32. <i>Dijagram tijeka rada Mathis TCi programa</i>	45
Slika 33. <i>Linearna ovisnost otpora senzora i njegove temperature</i>	47
Slika 34. <i>Odnos napona o vremenu</i>	48
Slika 35. <i>Odnos $1/m$ i efuzivnosti</i>	48
Slika 36. <i>Primjer izgleda kalibracijske krivulje</i>	49
Slika 37. <i>Proces izrade kalibracijskih krivulja [34]</i>	51
Slika 39. <i>Dijagram funkcioniranja računalnog programa "Mathis TCi" uređaja</i>	53
Slika 38. <i>Uzorci</i>	1
Slika 40. <i>Grafički prikaz rezultata ispitivanja za uzorak M1 s glycolom</i>	54
Slika 41. <i>Grafički prikaz rezultata ispitivanja uzorka M2 s vodom kao kontaktnim sredstvom</i>	55
Slika 42. <i>Grafički prikaz rezultata ispitivanja uzorka M2 s glycolom kao kontaktnim sredstvom</i>	56
Slika 43. <i>Grafički prikaz rezultata ispitivanja za uzorak G1 s glycolom kao kontaktim sredstvom</i>	57
Slika 44. <i>Grafički prikaz rezultata ispitivanja uzorka G2 s vodom kao kontaktnim sredstvom</i>	58
Slika 45. <i>Grafički prikaz rezultata ispitivanja uzorka G2 s glycolom kao kontaktnim sredstvom</i>	59
Slika 46. <i>Grafički prikaz rezultata ispitivanja za uzorak B1 s glycolom kao kontaktnim sredstvom</i>	60
Slika 47. <i>Grafički prikaz rezultata ispitivanja za uzorak B2 s vodom kao kontaktnim sredstvom</i>	61
Slika 48. <i>Grafički prikaz rezultata ispitivanja za uzorak B2 s glycolom kao kontaktnim sredstvom</i>	62
Slika 49. <i>Grafički prikaz rezultata ispitivanja suhog uzorka ytonga bez kontaktnog sredstva</i>	64
Slika 50. <i>Rezultati ispitivanja opeke s upotrebom različitih kontaktnih sredstava</i>	65
Slika 51. <i>Usporedba kalibracijskih krivulja</i>	68
Slika 52. <i>Odnos toplinske provodljivosti i $1/m$</i>	70

Slika 53. <i>Odnos efuzivnosti i toplinske provodljivosti</i>	70
Slika 54. <i>Promjena toplinske provodljivosti cementne paste $v/c = 0,3$</i>	76
Slika 55. <i>Relativna promjena toplinske provodljivosti cementne paste $v/c = 0,3$</i>	76
Slika 56. <i>Relativna promjena specifičnog toplinskog kapaciteta cementne paste $v/c = 0,3$</i> ...	77
Slika 57. <i>Promjena efuzivnosti cementne paste $v/c = 0,3$</i>	77
Slika 58. <i>Relativna promjena efuzivnosti cementne paste $v/c = 0,3$</i>	78
Slika 59. <i>Promjena $1/m$ cementne paste $v/c = 0,3$</i>	78
Slika 60. <i>Promjena toplinske provodljivosti cementne paste $v/c = 0,4$</i>	79
Slika 61. <i>Relativna promjena toplinske provodljivosti cementne paste $v/c = 0,4$</i>	79
Slika 62. <i>Relativna promjena specifičnog toplinskog kapaciteta cementne paste $v/c = 0,4$</i> ...	80
Slika 63. <i>Promjena efuzivnosti cementne paste $v/c = 0,4$</i>	80
Slika 64. <i>Relativna promjena efuzivnosti cementne paste $v/c = 0,4$</i>	81
Slika 65. <i>Promjena $1/m$ cementne paste $v/c = 0,4$</i>	81
Slika 66. <i>Mjerena toplinska provodljivost svježe cementne paste u ovisnosti o početnom vodocementnom omjeru [24, 39, 40]</i>	82

POPIS TABLICA:

Tablica 1. <i>Osnovne vrijednosti za toplinsku difuzivnost raznih građevinskih materijala [6] ..</i>	12
Tablica 2. <i>Osnovne vrijednosti za efuzivnost raznih građevinskih materijala [6]</i>	14
Tablica 3. <i>Karakteristične vrijednosti toplinske provodljivosti [8].....</i>	17
Tablica 4. <i>Toplina hidratacije ovisno o mineralnom sastavu cementa</i>	21
Tablica 5. <i>Literaturne vrijednosti za toplinsku provodljivost hidratizirajuće cementne paste [24]</i>	27
Tablica 6. <i>Uporaba kontaktnih sredstava</i>	42
Tablica 7. <i>Parametri kalibracijskih krivulja proizvođača Mathis [38].....</i>	1
Tablica 8. <i>Prikaz mjerenih materijala i njihovih oznaka</i>	52
Tablica 9. <i>Rezultati ispitivanja uzorka mramora (M1)</i>	54
Tablica 10. <i>Rezultati ispitivanja za uzorak M2 s vodom kao kontaktnim sredstvom</i>	55
Tablica 11. <i>Rezultati ispitivanja za uzorak M2 s glycolom kao kontaktnim sredstvom</i>	56
Tablica 12. <i>Rezultati ispitivanja za uzorak G1.....</i>	57
Tablica 13. <i>Rezultati ispitivanja mokrog uzorka G2 s vodom kao kontaktnim sredstvom.....</i>	58
Tablica 14. <i>Rezultati ispitivanja uzorka G2 s glycolom kao kontaktnim sredstvom</i>	59
Tablica 15. <i>Rezultati ispitivanja za uzorak B1 s glycolom kao kontaktnim sredstvom</i>	60
Tablica 16. <i>Rezultati ispitivanja za uzorak B2 s vodom kao kontaktnim sredstvom</i>	61
Tablica 17. <i>Rezultati ispitivanja za uzorak B2 s glycolom kao kontaktnim sredstvom</i>	62
Tablica 18. <i>Rezultati ispitivanja uzorka O1, bez kontaktnog sredstva.....</i>	63
Tablica 19. <i>Rezultati ispitivanja suhog uzorka ytonga bez kontaktnog sredstva</i>	64
Tablica 20 <i>Preporuke „Mathis Tci“ za odabir kalibracijskih krivulja [38]</i>	66
Tablica 21. <i>Srednje vrijednosti rezultata ispitivanja pune opeke korištenjem kalibracijskih krivulja za pjene i kompozitne materija</i>	66
Tablica 22. <i>Usporedba rezultata ispitivanja</i>	72
Tablica 23. <i>Specifični toplinski kapacitet za vodocementne omjere 0,3 i 0,4</i>	75

LITERATURA:

- [1] Bezjak, M.: *Analiza i primjena dinamičkog mjerenja toplinske provodljivosti građevnih materijala*, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2007.
- [2] Šimetin, V.: *Građevinska fizika*, Fakultet građevinski znanosti Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 1983
- [3] Kulišić, P.: *Mehanika i toplina*, Školska knjiga, Zagreb, 2005.
- [4] Galović, A.: *Termodinamika 2*, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2003.
- [5] Mikulić, D.: *Građevinska fizika - predavanja*, Građevinski fakultet, Sveučilišta u Zagrebu, 2009./2010
- [6] Vilems, M.; Šild, K.; Dinter S.: *Vieweg građevinska fizika: priručnik*, građevinska knjiga, Beograd, 2008.
- [7] Vasiljević, S.: *Građevinska fizika*, Fakultet građevinskih znanosti Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 1979.
- [8] Barić, D.: *Materijali za toplinsku izolaciju u građevinama*, Završni rad, Zagreb, 2008.
- [9] HRN EN ISO 10456:2008 *Građevni materijali i proizvodi -- Svojstva s obzirom na toplinu i vlagu -- Tablične projektne vrijednosti i postupci određivanja nazivnih i projektnih toplinskih vrijednosti*, 2008.
- [10] Bjegović D., Štirmer N.: *Teorija i tehnologija betona - predavanja*, Građevinski fakultet, Sveučilišta u Zagrebu, 2009./2010.
- [11] Ukrainczyk, V.: *Beton - Struktura, Svojstva, Tehnologija*, Alcor, Zagreb, 1994.
- [12] Đureković, A.: *Cement, cementni kompozit i dodaci za beton*, Školska knjiga, Zagreb, 1996.
- [13] Byfors, J.: *Plain concrete at early age*, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, Sweden, 1980.

- [14] Rastrup, E.: *Heat of Hydration*, Mag Concr Res 6 (17), pp. 127–140, 1954.
- [15] Springenschmid, R.: *Prevention of Thermal Cracking in Concrete*, E & FN Spon, London, 1998.
- [16] Milovanović, B.; Mikulić, D.; Đurinek, M.; Uzelac, S.: *Finite Element Simulation of Temperature and Stress Development in Mass Concrete // The proceedings of the first international conference on computational technologies in concrete structures*, Jeju, 2009.
- [17] De Schutter, G.; Taerwe, L.: *Specific heat and thermal diffusivity of hardening concrete*, 1995.
- [18] Bouguerra, A.; Laurent, J.P.; Goual, M.S.; Queneudec, M.: *The measurement of the thermal conductivity of solid aggregates using the transient plane source technique*, Phys D: Appl Phys 30:2900–2904, 1997.
- [19] Kim, K.H.; Jeon, S.E.; Kim, J.K.; Yang, S.: *An experimental study on thermal conductivity of concrete*, Cement Concrete Res 33:363–371, 2003.
- [20] Gibbon, G.J.; Ballim, Y.: *Determination of the thermal conductivity of concrete during the early stages of hydration*, Mag Concrete Res 50(3):229–235, 1998.
- [21] Khan, A.A.; Cook, W.D.; Mitchell, D.: *Thermal properties and transient thermal analysis of structural members during hydration*, ACI Mater J 95 (3):293–303, 1998.
- [22] Mounanga, P.; Khelidj, A.; Bastian, G.: *Experimental study and modelling approaches for the thermal conductivity evolution of hydrating cement paste*, Adv Cement Res 16 (3):95–103, 2004.
- [23] Morabito, P.: *Thermal properties of concrete: variations with the temperature and during the hydration phase*, BE96–3843/2001:18–4, 2001.
- [24] Bentz, D.P.: *Transient plane source measurements of the thermal properties of hydrating cement pastes*, National Institute of Standards and Technology, USA, 2007.
- [25] Hansen, P.F.; Hansen, J.; Hougaard, K.; Pedersen, E.J.: *Thermal Properties of Hardening Cement Paste. In: Proceedings of RILEM international conference on concrete at early ages*, RILEM, 23–36, Paris, 1982.

- [26] Chung, Xu.Y. : *Effect of sand addition on the specific heat and thermal conductivity of cement*, Cement Concrete Res 30:59–61, DDL, 2000.
- [27] *Measurement of material thermo- physical properties*, University of West Bohemia
- [28] *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, CRC Press, Boca Raton, FL, 1987.
- [29] Maréchal, J.C.: *Conductivité Thermique des Matériaux du Bâtiment*, Annales de l'ITBTP, no. 185, pp. 435–442. 1963.
- [30] *RILEM Technical Recommendation Testing of the Cracking Tendency of Concrete at Early Ages in the Cracking Frame Test*, Materials and Structures, pp. 461-464- , 30, October 1997.
- [31] Norma: HRN EN 1946-2:2000 (*Toplinske značajke građevnih proizvoda i elemenata- Posebni kriteriji za ocjenu laboratorija koji mjere svojstva prenošenja topline – 2. dio: Mjerenje pločastim uređajem sa zaštićenom vrućom pločom (EN 1946-2:1999)*)
- [32] *HRN EN ISO 12570:2002 Značajke građevnih materijala i proizvoda s obzirom na toplinu i vlagu -- Određivanje vlage sušenjem na povišenoj temperaturi*
- [33] Norma: HRN EN 1946-4 (*Toplinske značajke građevnih proizvoda i elemenata- Posebni kriteriji za ocjenu laboratorija koji mjere svojstva prenošenja topline – 4. dio: Mjerenje metodom vruće komore*)
- [34] *Patent No.: US 6, 676,287 B1, United States Patent*
- [35] *Patent No.: 5,595,064, United States Patent*
- [36] Al-Ajlan; Saleh, A.: *Measurements of thermal properties of insulation materials by using transient plane source technique*, Energy Research Institute, Saudi Arabia, 2006.
- [37] Kozjak, N.: *Ispitivanje toplinskih svojstava materijala*, Diplomski rad, Zagreb, 2009.
- [38] *Methis TCi User Manual*
- [39] Pope, A.L.; Zawilski, B.; Tritt, T.M.: *Description of removable sample mount apparatus for rapid thermal conductivity measurements*, Clemson University, USA, 2001.

- [40] Allaire, G.: *Shape Optimization by the Homogenization Method*, Springer Verlag, New York, 2002.
- [41] N., Bijelić: *Praćenje transformacije cementnih kompozita iz pseudo- viskoznog u kruto stanje elastičnim valovima*, Zagreb, 2009.
- [42] Vlajić, M.: *Tehnologija materijala*, IRO Građevinska knjiga, Beograd, 1982.

SAŽETAK

Maja Jaković, Ivana Slaviček

Analiza toplinskih svojstava građevnih materijala primjenom metode vrućeg diska

Dugotrajnost, neekonomičnost i složenost stacionarnih metoda ispitivanja toplinske provodljivosti usmjerile su istraživanja prema nestacionarnim metodama ispitivanja toplinskih svojstava materijala. U ovom radu ispitivana su toplinska svojstva materijala (provodljivost, efuzivnost, difuzivnost, toplinski kapacitet i otpor prolaska topline) ekonomičnom i brzom metodom vrućeg diska pomoću uređaja Mathis Tci“. Ispitivani su uzorci, često korištenih građevnih materijala, opeke, mramora, granita i betona u suhom i vlažnom stanju primjenom različitih kontaktnih sredstava (voda, glycol i glycerin) te su ispitivani uzorci svježe cementne paste vodocementnih omjera $v/c = 0,3$ i $v/c = 0,4$ kako bi se odredila promjena vrijednosti toplinskih svojstava hidratizirajuće cementne paste.

Ključne riječi: metoda vrućeg diska, toplinska provodljivost, efuzivnost, građevni materijali, cementna pasta

SUMMARY

Maja Jaković, Ivana Slaviček

Analysis of thermal properties of building materials by using transient plane source method

The duration, complexity and uneconomical steady state methods for thermal conductivity measurements have directed the research of thermal properties of materials toward transient methods. The thermal properties of materials (conductivity, effusivity, diffusivity, heat capacity and thermal resistance) have been analyzed by cost-effective and rapid method by using a transient source, a planar disk. For this purpose a Mathis Tci analyzer has been used. Test samples have been commonly used building materials, brick, marble, granite and concrete in dry and saturated state. Different contact agents (water, glycol and glycerin) were used. On the samples of fresh cement paste with different water to cement mass ratio ($w/c = 0.3$ or $w/c = 0.4$) the value of thermal properties change during hydration were determined.

Key words: transient source method, thermal conductivity, effusivity, construction materials, cement paste

ZAHVALE

Prof. dr. sc. Dunji Mikulić, dipl. ing. fizike, na stručnom vodstvu i korisnim savjetima,
Bojanu Milovanoviću, dipl. ing. građ., na inventivnosti i radišnosti,
Ivanu Gabrijelu, dipl. ing. građ., na suradnji,
Zvezdani Matuzić, ing. građ. i Miru Matuziću, ing. prometa, na ugodnoj radnoj atmosferi.