

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



MARKO NUSDORFER

**TOPLOTNA PREVODNOST GRADBENIH
MATERIALOV**

DIPLOMSKA NALOGA

**UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI PROGRAM
PRVE STOPNJE GRADBENIŠTVO**

Ljubljana, 2017

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si

UNIVERZITETNI
ŠTUDIJSKI PROGRAM
PRVE STOPNJE
GRADBENIŠTVO

Kandidat/-ka:

MARKO NUSDORFER

TOPLOTNA PREVODNOST GRADBENIH MATERIALOV

THERMAL CONDUCTIVITY OF BUILDING MATERIALS

Mentor/-ica:

prof. dr. Zvonko Jagličić

Somentor/-ica:

asist. dr. David Antolinc

Član komisije:

Predsednik komisije:

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE

Spodaj podpisan študent Marko Nusdorfer, vpisna številka 26110567, avtor pisnega zaključnega dela študija z naslovom:

»Toplotna prevodnost gradbenih materialov«,

IZJAVLJAM

1. *Obkrožite eno od variant a) ali b)*

- ☒ a) da je pisno zaključno delo študija rezultat mojega samostojnega dela;
- b) da je pisno zaključno delo študija rezultat lastnega dela več kandidatov in izpolnjuje pogoje, ki jih Statut UL določa za skupna zaključna dela študija ter je v zahtevanem deležu rezultat mojega samostojnega dela;
2. da je tiskana oblika pisnega zaključnega dela študija istovetna elektronski obliki pisnega zaključnega dela študija;
3. da sem pridobil/-a vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v pisnem zaključnem delu študija in jih v pisnem zaključnem delu študija jasno označil/-a;
4. da sem pri pripravi pisnega zaključnega dela študija ravnal/-a v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobil/-a soglasje etične komisije;
5. soglašam, da se elektronska oblika pisnega zaključnega dela študija uporabi za preverjanje podobnosti vsebine z drugimi deli s programsko opremo za preverjanje podobnosti vsebine, ki je povezana s študijskim informacijskim sistemom članice;
6. da na UL neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico dajanja pisnega zaključnega dela študija na voljo javnosti na svetovnem spletu preko Repozitorija UL;
7. da dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v pisnem zaključnem delu študija in tej izjavi, skupaj z objavo pisnega zaključnega dela študija.

V Ljubljani, 09. 06. 2017

Podpis študenta:

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	/
Avtor:	Marko Nusdorfer
Mentor:	prof. dr. Zvonko Jagličič
Somentor:	asist. dr. David Antolinc
Naslov:	Toplotna prevodnost gradbenih materialov
Tip dokumenta:	Dipl. nal. – UNI
Obseg in oprema:	22 str., 2 razpred., 28 slik.
Ključne besede:	toplotna prevodnost, gostota toplotnega toka, merilnik toplotne prevodnosti, relativna vlažnost materiala, XPS, porobeton

Izvleček

Izdelali smo merilnik toplotne prevodnosti in izmerili toplotno prevodnost dveh materialov. Najprej smo opisali standarde, ki se navezujejo na merjenje toplotne prevodnosti gradbenih materialov. Nato smo raziskali princip delovanja obstoječih merilnikov, ki so na voljo na tržišču. Toplotno prevodnost homogenega materiala smo ugotovili tako, da smo izmerili gostoto toplotnega toka pri danem temperaturnem gradientu in debelini vzorca. Merilnik smo sestavili iz grelnika, dveh senzorjev gostote toplotnega toka in temperature, ročnim kontrolerjem za zajem podatkov in ventilatorja. Natančnost merilnika smo ocenili tako, da smo za isti preizkušane primerjali izmerjene vrednosti toplotne prevodnosti z vrednostmi izmerjenimi na certificiranem komercialnem merilniku. Nazadnje smo izmerili toplotno prevodnost dveh toplotno-izolacijskih materialov: porobetona in ekstrudiranega polistirena. Porobetonski preizkušane smo merili v suhem in vlažnem stanju. Ugotovili smo, da toplotna prevodnost porobetona raste približno linearno z relativno vlažnostjo preizkušanca.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDK: /

Author: Marko Nusdorfer

Supervisor: Prof. Zvonko Jagličič, Ph.D.

Co-supervisor: Assist. Prof. David Antolinc, Ph.D.

Title: Thermal conductivity of building materials

Document type: Graduation Thesis – University Studies

Scope and tools: 22 p., 2 tab., 28 pic.

Keywords: thermal conductivity, thermal conductivity meter, material moisture, XPS, autoclaved aerated concrete

Abstract:

A thermal conductivity meter was assembled and the thermal conductivity of two materials was measured. We have done standards review which are describing the measurements of thermal conductivity of building materials and the main working principles of the thermal conductivity meters currently available on the market. In order to calculate a thermal conductivity of homogeneous material we measured a heat flux through sample of known thickness and a temperature gradient. The assembled thermal conductivity meter consists of a heater, two heat flux sensors, data logger and a fan. The precision of the apparatus was estimated by comparing the thermal conductivity determined by certified thermal conductivity meter, with our result. Finally, we measured the thermal conductivity of two insulating building materials: aerated concrete and extruded polystyrene. The aerated concrete was measured in various humidity conditions. The thermal conductivity of aerated concrete increases approximately linearly with the relative humidity increasing of the sample.

KAZALO VSEBINE

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA	I
IZJAVE	II
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	III
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	IV
KAZALO VSEBINE	V
KAZALO PREGLEDNIC	VI
KAZALO SLIK	VII
1 UVOD	1
2 PREGLED STANDARDOV IN LITERATURE, KI DOLOČAJO POSTOPKE IN NAPRAVE ZA MERJENJE TOPLOTNE PREVODNOSTI	2
2.1 Zakonodaja	2
2.1 Pregled naprav od enostavnih do profesionalnih	3
3 PRENOS TOPLOTE	5
3.1 Fizikalno ozadje	5
3.1 Vpliv notranje vlage na prenos toplote	5
4 OSNOVE DELOVANJA MERILNIKA	6
5 OPIS MERILNIKA	7
5.1 Senzor gostote toplotnega toka	7
5.2 Grelnik	8
5.3 Hlajenje	8
5.4 Paroneprepustna vreča	10
5.5 Celoten merilnik	11
6 UMERITEV MERILNIKA	12
6.1 Preizkušanci	12
6.2 Meritve na ekstrudiranem polistirenu	12
6.3 Meritve na porobetonu	13
6.3.1 Vpliv vlažnosti na toplotno prevodnost porobetona	15
7 ZAKLJUČEK	21
VIRI	22

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Deklarirana toplotna vrednost preizkušenih materialov v suhem stanju.	12
Preglednica 2: Izračun relativne vlažnosti in toplotna prevodnost različno vlažnih preizkušancev.	19

KAZALO SLIK

Slika 1: Merilnik toplotne prevodnosti Cussons P5687 [6]	3
Slika 2: Merilnik toplotne prevodnosti Netzsch HFM 436 Lambda [7]	4
Slika 3: Shema delovanja merilnika toplotne prevodnosti Netzsch HFM 436 Lambda [7]	4
Slika 4: Zmanjšanje toplotnega toka v odvisnosti od povečevanja debeline izolacije iz ekstrudiranega polistirena [11]	6
Slika 5: Senzor gostote toplotnega toka Ahlborn FQAD18T	7
Slika 6: Izhodni podatki ročnega merilnega inštrumenta Ahlborn ALMEMO 2490	8
Slika 7: Grelna plošča	8
Slika 8: Računalniški ventilator	9
Slika 9: Pokončno postavljen ventilator	9
Slika 10: Ležeče postavljen ventilator	9
Slika 11: Meritve temperaturne razlike v odvisnosti od časa za pokončno postavljen ventilator	10
Slika 12: PVC paroneprepustna vreča Easy Home	10
Slika 13: Komponente merilnika toplotne prevodnosti	11
Slika 14: Fotografija merilnika toplotne prevodnosti	11
Slika 15: Priprava XPS preizkušanca	12
Slika 16: Temperaturna razlika ΔT med zgornjim in spodnjim senzorjem in gostota toplotnega toka q v odvisnosti od časa	13
Slika 17: Priprava porobetonskega preizkušanca	14
Slika 18: Gostota toplotnega toka in temperaturna razlika skozi zračno suh porobetonski vzorec	14
Slika 19: Porobetonski preizkušanec ovit v vrečo.	15
Slika 20: Navlaževanje porobetonskega preizkušanca	16
Slika 21: Tehtanje preizkušanca	16
Slika 22: Namakanje porobetonskega preizkušanca	16
Slika 23: Prisilno posušen porobetonski preizkušanec	17
Slika 24: Zračno vlažen porobetonski preizkušanec	17
Slika 25: Porobetonski preizkušanec navlažen s 30 ml vode	18
Slika 26: Porobetonski preizkušanec navlažen s 100 ml vode	18
Slika 27: Popolnoma zasičen porobetonski preizkušanec	19
Slika 28: Izmerjena korelacija med toplotno prevodnostjo in relativno vlažnostjo porobetona	20

1 UVOD

Največji delež stroškov v življenski dobi stavbe v Evropi predstavlja ogrevanje [1]. Da bi ta del stroškov zmanjšali, iščemo načine, s katerimi bi toploto čimbolj učinkovito dovedli v stavbo in zmanjšali toplotne izgube skozi stavbni ovoj. Toplota se v opazovanem sistemu prenaša s področja višjih na področja nižjih temperatur, dokler se ti ne izenačita. Toplota se prenaša s prevajanjem, konvekcijo in sevanjem. V gradbenih konstrukcijah je prevladujoč način prenosa prevajanje. Večino toplotnih izgub v običajnih stavbah povzročajo premajhna debelina izolacije in prekinitve toplotnoizolacijske plasti.

V diplomski nalogi se bom podrobneje osredotočil na lastnosti gradbenih materialov v stavbnem ovoju, katere vplivajo na prevajanje toplote. Da bi toplotno izolacijske lastnosti gradbenih materialov lahko preiskovali na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo, smo se odločili, da bomo izdelali in umerili merilnik za merjenje toplotne prevodnosti za večino gradbenih materialov.

2 PREGLED STANDARDOV IN LITERATURE, KI DOLOČAJO POSTOPKE IN NAPRAVE ZA MERJENJE TOPLOTNE PREVODNOSTI

2.1 Zakonodaja

Najprej sem preučil standarde, ki določajo postopke in robne pogoje za merilnike toplotne prevodnosti. Postopke in pogoje najdemo v sledečih standardih:

- SIST EN 12667:2002. Toplotne karakteristike gradbenih materialov in proizvodov – Ugotavljanje toplotne upornosti z zaščiteno vročo ploščo in/ali merilniki toplotnih tokov. Proizvodi z visoko ali srednjo toplotno upornostjo [2].
- SIST EN 12939:2001. Toplotne značilnosti gradbenih materialov in proizvodov – Ugotavljanje toplotne upornosti s ščiteno ploščno napravo in z napravo z merilniki gostote toplotnega toka- Izdelki velike debeline z visoko in srednje visoko toplotno upornostjo [3].
- SIST EN 12664:2002. Toplotne karakteristike gradbenih materialov in proizvodov – Ugotavljanje toplotne upornosti z zaščiteno vročo ploščo in/ali merilniki toplotnih tokov – Suhi ali vlažni proizvodi s srednjo ali nizko toplotno upornostjo [4].

V standardu SIST EN 12667:2002 [2], je navedeno, kako se analizira toplotna prevodnost gradbenih materialov. Stavbni ovoj razdelimo na področja s skupnimi toplotnoizolacijskimi lastnostmi in posebnostmi. Te so:

- homogene konstrukcije,
- enostavno nehomogene konstrukcije,
- konstrukcije z zaprto rego z zrakom ali plinom,
- konstrukcije z odprto ali prezračeno rego,
- ozelenele gradbene konstrukcije in
- konstrukcije v stiku s tlemi.

Merilnik, ki smo ga izdelali, je primeren za analizo toplotne prevodnosti homogenih gradbenih materialov. Homogeni materiali so tisti, ki imajo v vsaki točki enake snovne lastnosti.

Standarda SIST EN 12939:2001 [3] in SIST EN 12664:2002 [4] opisujeta pripravo preizkušancev za merilnik toplotne prevodnosti.

Izolacijske materiale se testira v vlažnem in suhem stanju. Priprava suhega preizkušanca poteka tako, da najprej preizkušanec posušimo v dobro ventilirani pečki pri 105 - 110 °C. Tak proces naj ne bi spremenil kemijske in fizikalne narave materiala. Po sušenju, preizkušanca ovijemo v paroneprepustno vrečo in ga stehtamo pred in po meritvi. Vidna kondenzacija na stenah vrečke ne sme nastati [3].

Testiranje vlažnega preizkušanca ni norma in se uporablja le za pridobitev faktorja korelacije med suhim in vlažnim stanjem materiala. Za določitev vpliva vrečke na toplotno prevodnost, meritev izvedemo na suhem preiskušancu z in brez vrečke [3].

2.1 Pregled naprav od enostavnih do profesionalnih

Na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo merimo toplotno prevodnost gradbenih materialov s senzorjem gostote toplotnega toka. Da bomo dobili bolj stacionarne pogoje, smo se odločili, da smo postavili vzorce v izolacijo, kjer je bila temperatura vzorca regulirana z grelnikom in hladilnikom. Pri izbiri komponent smo si pomagali s pregledom že obstoječih naprav.

V knjigi Saša Medveda, Gradbena fizika [1] je prikazan merilnik toplotne prevodnosti, ki ga uporabljajo na Fakulteti za strojništvo, Univerze Ljubljani. Izolativno ohišje je iz ekspaniranega polistirena. Temperature pa uravnava dva ventilatorja na hladilnih rebrih. Na univerzi v Cassinu je merilniku toplotne prevodnosti [5] zagotovljena stalna temperaturna razlika z uporabo vodnega hlajenja. Na spletu smo našli merilnik toplotne prevodnosti Cussons P5687 [6] (na sliki 1). Preizkušanec se v merilnik vertikalno postavi med električni grelnik in vodno hlajena rebra. Merilnik ima na zgornji in spodnji strani preizkušanca postavljene 4 senzorje gostote toplotnega toka in 2 termometra. Na sprednji strani merilnika sta monitorja, ki prikazujeta trenutno temperaturo preizkušanca in grelno moč. Grelno moč se lahko spreminja s vrtljivim gumbom na sprednji strani merilnika. Hladilna tekočina je dovedena v vakuumsko izolirano termovko na zgornji strani merilnika.



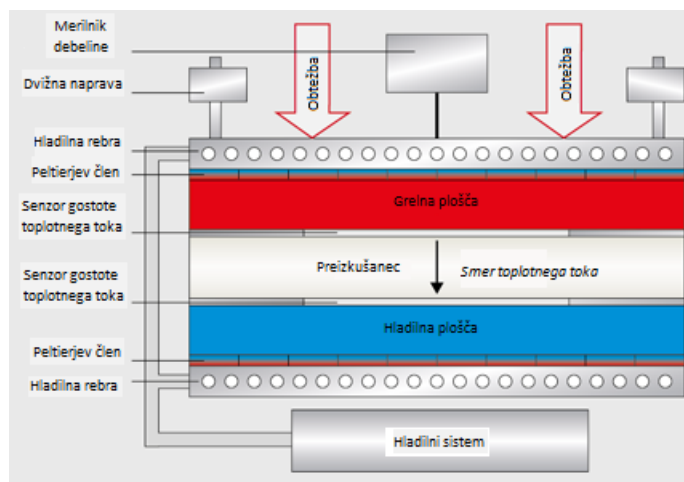
Slika 1: Merilnik toplotne prevodnosti Cussons P5687 [6]

Na spletu smo našli merilnik toplotne prevodnosti Netzsch HFM 436 Lambda (slika 2).



Slika 2: Merilnik toplotne prevodnosti Netzsch HFM 436 Lambda [7]

Uporabnik postavi preizkušane med dve grelni plošči, katerima lahko določi temperaturo. Temperatura v ploščah je elektronsko nadzorovana z dvema Peltierjevima členoma in uravnana s pomočjo grelnika ter vodnega hlajenja. Dvižna naprava v merilniku omogoča merjenje preizkušancev različnih debelin, tako da povzroči dodatno obtežbo na preizkušane in s tem zagotovi dober toplotni stik. Med meritvijo ustrezna elektronika v merilniku sproti beleži podatke in jih na koncu meritve izpiše. Proizvajalec navaja, da je ob uporabi obeh senzorjev gostote toplotnega toka, trajanje meritve posameznega preizkušanca 15 minut.



Slika 3: Shema delovanja merilnika toplotne prevodnosti Netzsch HFM 436 Lambda [7]

3 PRENOS TOPLOTE

3.1 Fizikalno ozadje

Toplota je delež energije, ki ob toplotnem stiku brez dela preide s toplejšega na hladnejše telo [8]. Toplotni tok je fizikalna količina, ki nam poda koliko toplote v časovni enoti preteče skozi izbrani prečni presek S . Toplotni tok teče spontano in le od telesa z višjo temperaturo k telesu z nižjo dokler se temperaturi teles ne izenačita. Pri našem merilniku se bomo osredotočili na prenos toplote s prevajanjem. Pri prevajanju toplote se med gradniki snovi s trki prenaša kinetična energija oz gibalna količina.

Gostota toplotnega toka predstavlja toplotni tok na enoto površine:

$$q = \frac{dP}{dS}. \quad (1)$$

kjer so

q gostota toplotnega tok [W/m²]

P toplotni tok [W]

S površina [m²]

Stanje sistema je stacionarno takrat, ko so fizikalne količine, ki opisujejo sistem, neodvisne od časa. Če v takem sistemu uporabimo poenostavitev, da toplota prehaja le v eni dimenziji, lahko gostoto toplotnega toka opišemo s formulo:

$$q = \frac{\lambda \cdot \Delta T}{d}. \quad (2)$$

kjer so

λ toplotna prevodnost [W/mK]

ΔT temperaturna razlika [°C, °K]

d debelina vzorca [m]

3.1 Vpliv notranje vlage na prenos toplote

Številne študije [9, 10] so pokazale, da na toplotno prevodnost λ vpliva temperatura in vlažnost. Tipičnim izolacijskim gradbenim materialom se toplotna prevodnost linearno povišuje s temperaturo medtem, ko vpliv vlage lahko opišemo z eksponentno funkcijo.

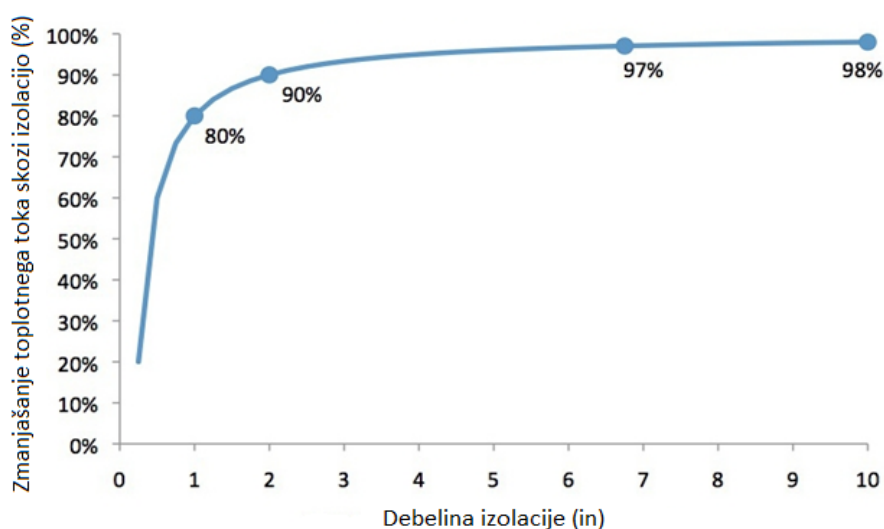
4. OSNOVE DELOVANJA MERILNIKA

Če iz enačbe za gostoto toplotnega toka (2) pri stacionarnih pogojih s poenostavitvijo enodimenzionalnega toka izrazimo toplotno prevodnost, dobimo:

$$\lambda = \frac{q \cdot d}{\Delta T}. \quad (3)$$

Pri znani debelini vzorca merimo gostoto toplotnega toka in temperaturo na obeh površinah. Po vzpostavitvi stacionarnega stanja gostota toplotnega toka doseže neko limitno vrednost. Temperaturna razlika ΔT , ki jo vstavimo v enačbo (3), je vrednost, ki pripada limitni vrednosti gostote toplotnega toka. Toplotno prevodnost potem izračunamo iz enačbe (3).

Pri merjenju toplotne prevodnosti se ne moremo izogniti merskim napakam. Slučajne napake izločimo s ponavljanjem meritev. Glavni problem pri merilniku predstavlja uhajanje toplote. Uhajanje toplote iz opazovanega sistema je sistemska napaka in se je ne moremo znebiti s ponavljanjem meritev. Uhajanja toplote ne moremo preprečiti, lahko ga le zmanjšamo z večjo izolacijo preizkušanca. Standard [3] nam poda, da je ustrezna izolacija preizkušanca takšen material, ki ima vsaj 1000-krat manjšo toplotno prevodnost od preizkušanca. Te zahteve nam ni uspelo izpolniti, zato ker so bili preizkušanci, ki smo jih merili, gradbeni materiali, ki se jih uporablja za toplotno izolacijo stavb in imajo že sami po sebi izredno nizko toplotno prevodnost. Toplotno uhajanje iz sistema lahko zmanjšamo s povečanjem debeline toplotne izolacije. Učinkovitost takega načina je omejena, saj od določene debeline izolacije naprej (slika 2), toplotnega toka skozi izolacijo bistveno ne zmanjšamo več [11].



Slika 4: Zmanjšanje toplotnega toka v odvisnosti od povečevanja debeline izolacije iz ekstrudiranega polistirena [11]

Odločili smo se, da bomo naredili 9 cm debelo toplotno izolacijo iz ekstrudiranega polistirena za naš preizkušani material.

5. OPIS MERILNIKA

5.1 Senzor gostote toplotnega toka

Uporabili smo merilnik gostote toplotnega toka Ahlborn FQAD18T Heat Flow Plate (slika 5). Senzor sestavljajo epoksidna ploščica, termočlen in voltmeter. Epoksidna ploščica ima znane dimenzije in znano toplotno prevodnost. Temperaturna razlika na epoksidni ploščici inducira električno napetost. Ta električna napetost je sorazmerna velikosti toplotnega toka, ki prehaja skozi epoksidno ploščico. Zgoraj navedeni senzor gostote toplotnega toka je dimenzij 120 x 120 mm² in zagotavlja termično napetost 1 mV pri gostoti toplotnega toka 8,31 W/m². Relativna natančnost meritve znaša 5 %.



Slika 5: Senzor gostote toplotnega toka Ahlborn FQAD18T

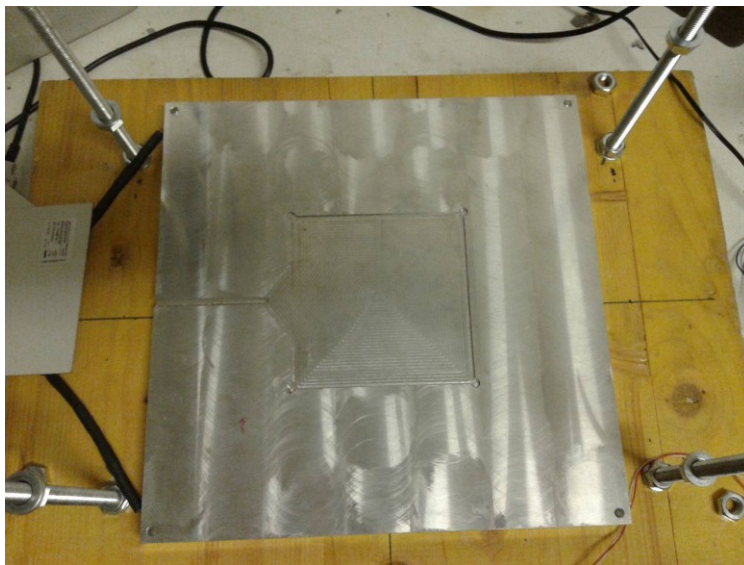
Senzor gostote toplotnega toka je povezan z ročnim kontrolerjem za zajem podatkov Ahlborn ALMEMO 2490, ki zapisuje meritve v spomin. Inštrument je povezljiv z računalnikom, kar nam omogoča, da pridobimo zapisnik meritev v excel obliki (slika 6). V vsaki vrstici zapisnika je shranjena vrednost temperature in toplotnega toka skozi oba senzorja ob določenem času.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	MEMORY:		* ALMEMO Control * Ver. AC-5.20.0.126 - 22/07/2016 06:00:00 * 23/05/2017 10:26:03					
2	ALMEMO	RANGE:	DIGI	DIGI	Diff	DIGI	DIGI	
3	2590-4AS	COMMENT:	q W/m² ZG	q W/m² SP		TemperatZG	TemperatSP	
4	V5	LIM-MAX:						
5		LIM-MIN:						
6	DATE:	TIME:	M00: Wm	M01: Wm	M04: Wm	M10: °C	M11: °C	
7	22.05.2017	14:02:49	-16.4	132.2	148.6	24.75	33.86	
8	22.05.2017	14:03:49	-6.6	109.7	116.3	24.29	34.06	
9	22.05.2017	14:04:49	-3.3	110.3	113.6	24.40	34.12	
10	22.05.2017	14:05:49	-4.4	92.5	96.9	24.33	34.21	
11	22.05.2017	14:06:49	-3.1	83.3	86.4	24.26	34.31	
12	22.05.2017	14:07:49	-4.3	76.6	80.9	24.22	34.39	
13	22.05.2017	14:08:49	-5.9	71.2	77.1	24.16	34.46	
14	22.05.2017	14:09:49	-45.4	66.8	112.2	23.99	34.52	
15	22.05.2017	14:10:49	-36.5	63.1	99.6	23.79	34.56	

Slika 6: Izhodni podatki ročnega merilnega inštrumenta Ahlborn ALMEMO 2490

5.2 Grelnik

Grelnik ima obratovalno moč 150 W na površini 30 x 30 cm². Grelna plošča (slika 7) je take velikosti, da bi zagotovila čim enakomernejši toplotni tok skozi preizkušanec. Na zgornji strani grelne plošče je po meri izdelana poglobitev za namestitev senzorja gostote toplotnega toka.



Slika 7: Grelna plošča

5.3 Hlajenje

Hlajenje smo zagotovili z običajnim računalniškim ventilatorjem premera 12cm (slika 8), ki stalno deluje in hladi zgornjo površino naprave, katerega krmi Arduino procesor.



Slika 8: Računalniški ventilator

Ventilator smo postavili na dva različna načina. Stoje smo ga postavili tako, da deluje v smeri pravokotno (pokončno, meritev 1, slika 9) na hladilno ploščo ter leže (meritev 2, slika 10), da deluje direktno v njo in stran od nje.

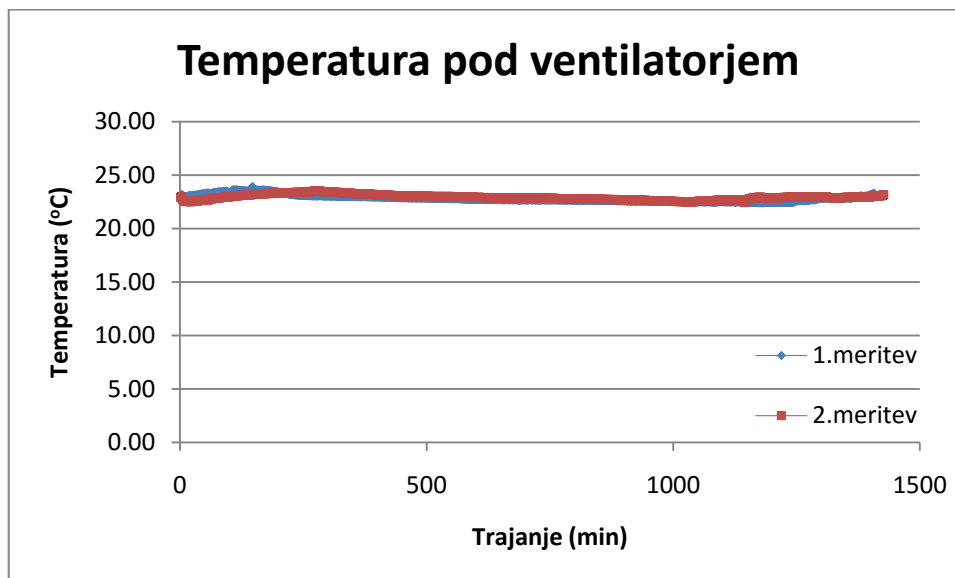


Slika 9: Pokončno postavljen ventilator



Slika 10: Ležeče postavljen ventilator

Rezultati merjenja temperature T na zgornji plošči po vključitvi grelca pri dveh postavitvah ventilatorja so na sliki 11.



Slika 11: Meritve temperaturne razlike v odvisnosti od časa za pokončno postavljen ventilator

Iz rezultatov meritev je razvidno, da postavitev ventilatorja zanemarljivo vpliva na naš merilnik.

5.4 Paroneprepustna vreča

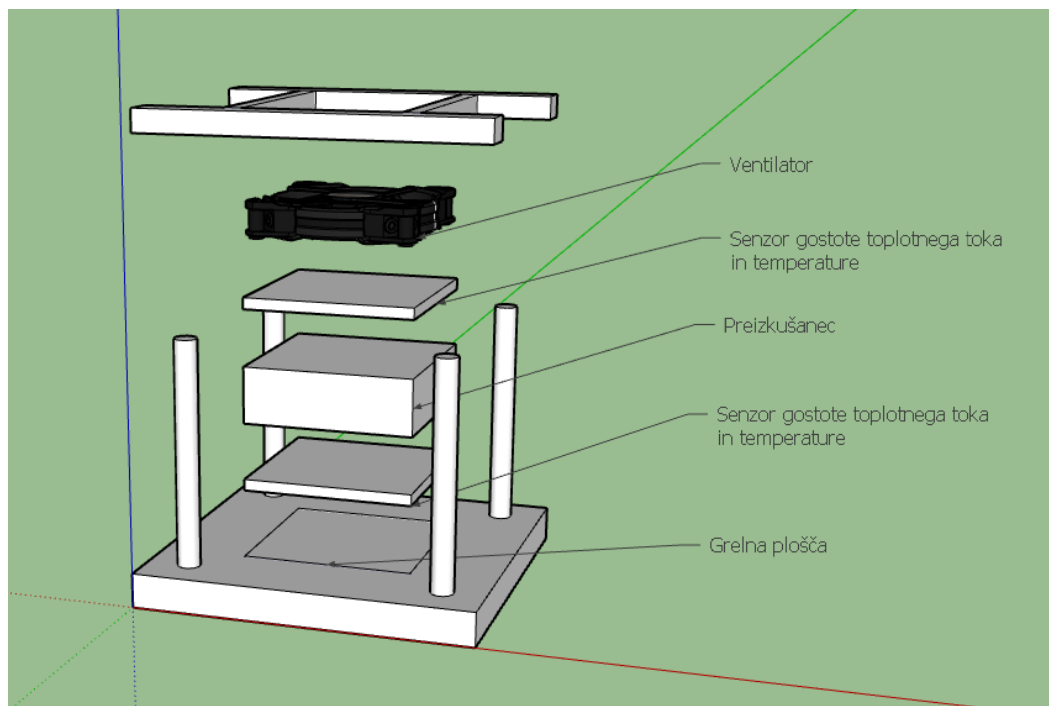
Ker smo merili tudi vlažne preizkušance, smo morali preprečiti izgubo vode med izvajanjem meritev. Zato smo uporabili paroneprepustne vakumske PVC vreče Easy Home debeline 0,1 mm [12]. Vreča je izredno tanka in ima zato zanemarljiv vpliv na izmerjeno toplotno prevodnost.



Slika 12: PVC paroneprepustna vreča Easy Home

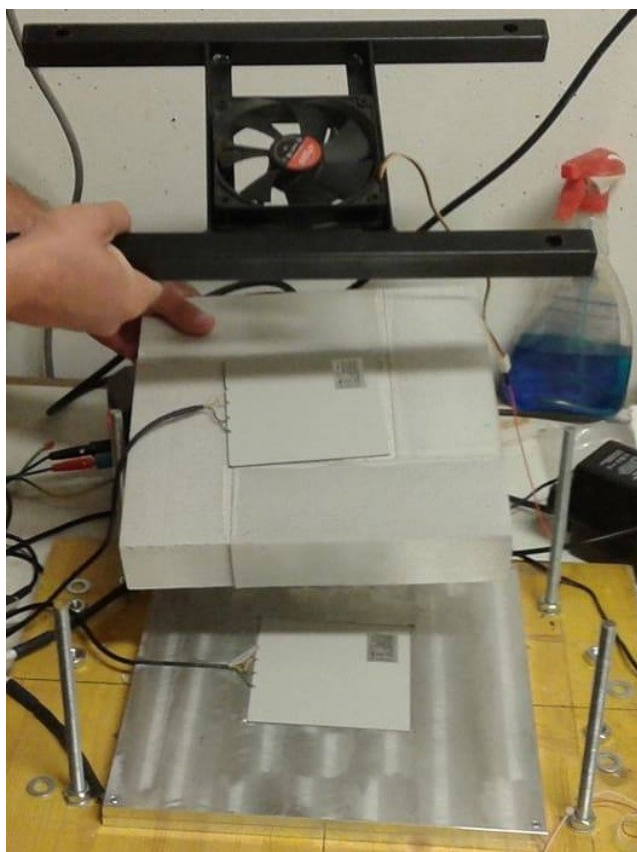
5.5 Celoten merilnik

Na sliki 13 je shema, ki kaže komponente merilnika toplotne prevodnosti:



Slika 13: Komponente merilnika toplotne prevodnosti

Na sliki 14 je fotografija celotnega merilnika toplotne prevodnosti v delujočem stanju:



Slika 14: Fotografija merilnika toplotne prevodnosti

6 UMERITEV MERILNIKA

6.1 Preizkušanci

Merilnik je primeren za meritve homogenih preizkušancev. Standard [2] nam poda navodila, kako ustrezno pripravimo preizkušanec. V svoji diplomski nalogi sem izvedel meritve na ekstrudiranem polistirenu (XPS) in porobetonu.

Porozni materiali bodo dobili ali izgubili vodno maso, dokler ni vzpostavljeno termalno in higrometrično ravnotežje z okolico. Z namenom, da bi določili vpliv vlažnosti na toplotno izolativnost porobetona, smo izvedli meritev na porobetonskih preizkušancih z različno vlažnostjo. Vlažnost preizkušanca je podana, kot relativna masna vlažnost, katera se izračuna po:

$$RH = \frac{m_{vlažen} - m_{suh}}{m_{suh}} * 100 \%. \quad (4)$$

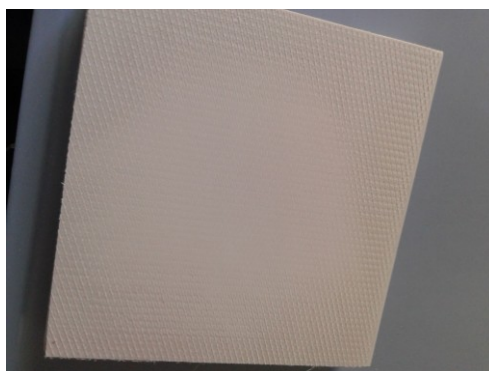
Zaradi zaprto celičnaste strukture ni mogoče navlažiti ekstrudiranega polistirena, kar je tudi vzrok za zanemarljiv vpliv vlažnosti na njegovo toplotno prevodnost. Merilnik omogoča merjenje vzorcev različnih debelin. Zaradi konsistentosti smo vse vzorce pripravili z debelino 5 cm.

Preglednica 1: Deklarirana toplotna vrednost preizkušenih materialov v suhem stanju [13, 14].

Ekstrudiran polistiren FIBRANxps 300 - L	0,039 W/mK
Ytong porobeton	0,120 W/mK

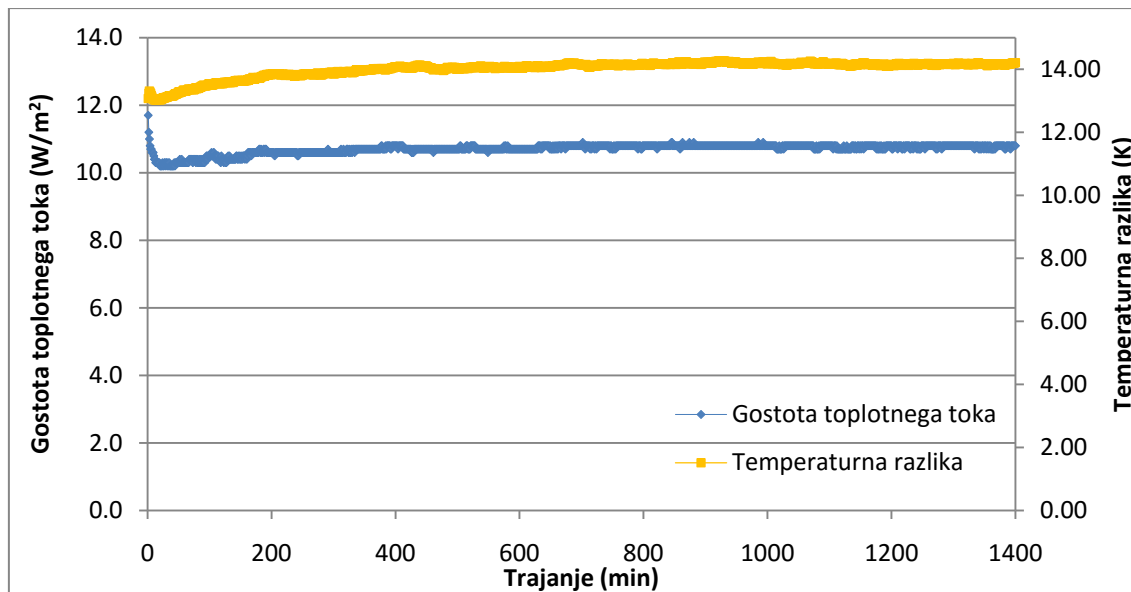
6.2 Meritve na ekstrudiranem polistirenu

Preizkušanec iz ekstrudiranega polistirena smo pripravili tako, da smo ga razrezali v obliko kvadra širine 30 cm in višine 5 cm. Površino preizkušanca smo pobrusili z brusnim papirjem, zato da smo izboljšali stik s senzorjem. Na sliki 15 je fotografija preizkušanca med pripravo.



Slika 15: Priprava XPS preizkušanca

Iz meritve na sliki 16 je razvidno, da gostota toplotnega toka spodnjega senzorja konvergira k limitni vrednosti $10,8 \text{ W/m}^2$. Temperaturna razlika ob limitni vrednosti je $14,1 \text{ K}$.



Slika 16: Temperaturna razlika ΔT med zgornjim in spodnjim senzorjem in gostota toplotnega toka q v odvisnosti od časa

Toplotno prevodnost izračunamo iz enačbe (5):

$$\lambda = \frac{10,8 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} * 0,05 \text{ m}}{14,1 \text{ K}} = 0,0383 \frac{\text{W}}{\text{mK}} \quad (5)$$

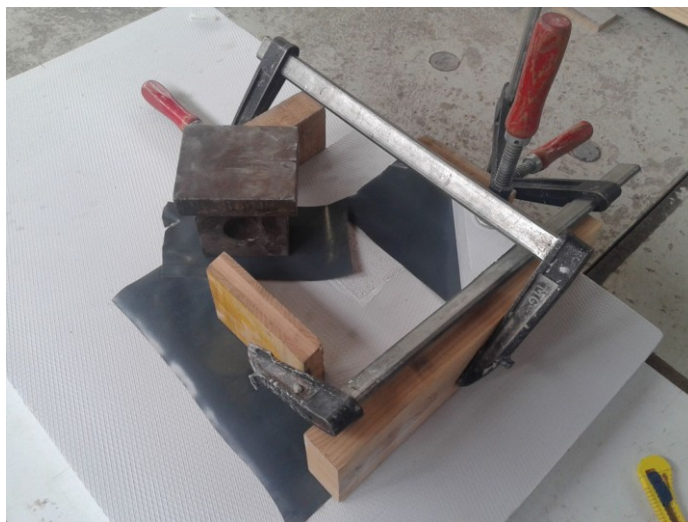
Relativno natančnost izračunane toplotne prevodnosti ocenjujemo na 10 % (temperaturno razliko ΔT na približno 3 %, gostoto toplotnega toka q na 5 % in debelino na 2 %). Zato lahko zapišemo:

$$\lambda = 0,038 \frac{\text{W}}{\text{mK}} (1 \pm 10 \%) = (0,038 \pm 0,004) \frac{\text{W}}{\text{mK}} \quad (6)$$

Deklarirana toplotna prevodnost testiranega ekstrudiranega polistirena je $0,039 \text{ W/mK}$ [14], kar se ob upoštevanju ocenjene napake meritve ujema z izmerjeno vrednostjo.

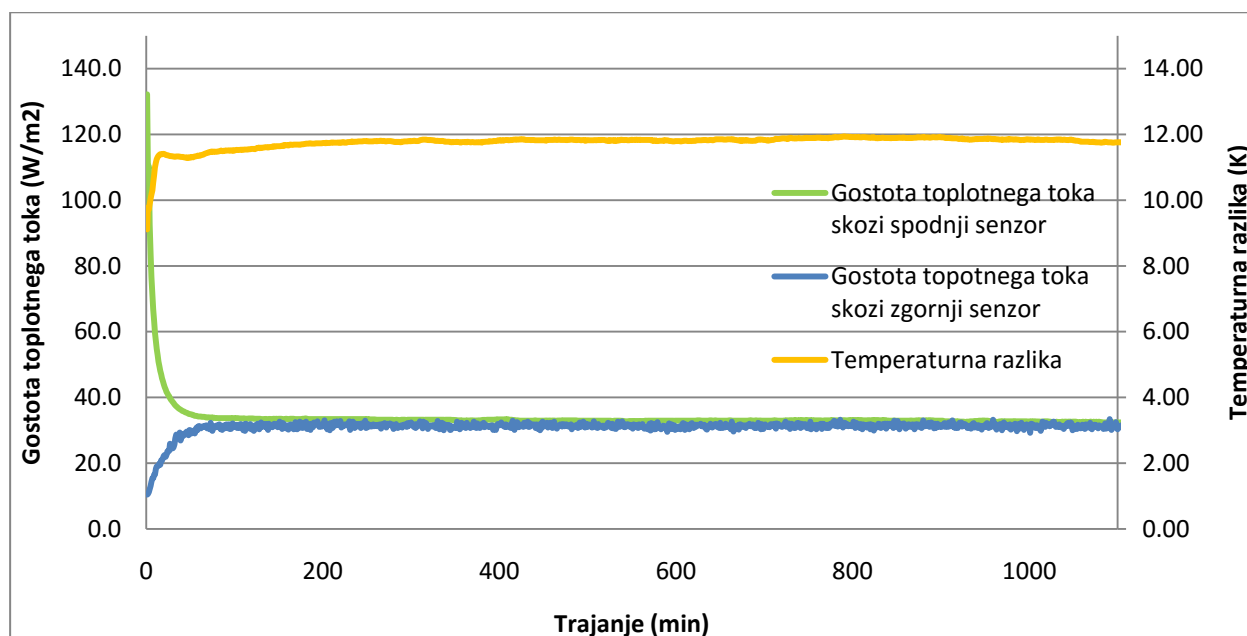
6.3 Meritve na porobetonu

Sestavili smo preizkušane iz porobetona. Pomembno je, da ima preizkušane čimbolj gladko površino, saj tako izboljšamo pretok toplote. Porobetonski preizkušane je višine 5 cm in širine 12 cm, kolikor je široka plošča senzorja. Uhajanje toplote preprečuje 9 cm široka plast ekstrudiranega polistirena na vsaki strani preizkušanca. Na sliki 17 je fotografija porobetonskega preizkušanca med pripravo.



Slika 17: Priprava porobetonskega preizkušanca

Na spodnji senzor, segrevan z grelnikom, smo postavili porobetonski preizkušanec. Nato smo nanj postavili zgornji senzor toplotnega toka in pritrdili pokrov. S pokrovom smo rahlo stisnili preizkušanec zato, da smo zagotovili čim bolj popoln kontakt med senzorjem in preizkušancem. Na zgornji senzor smo postavili ventilator, povezan z Arduino procesorjem, ki je vzdrževal sobno temperaturo. Senzorja gostote toplotnega toka smo nato povezali z ročnim kontrolerjem za zajem podatkov in začeli meritev. Meritev smo po 24ih urah prekinili. Vsak naslednji preizkušanec smo po istem postopku vgradili v merilnik. Na sliki 18 sem prikazal rezultate meritve.



Slika 18: Gostota toplotnega toka in temperaturna razlika skozi zračno suh porobetonski vzorec

Iz meritve je razvidno, da gostota toplotnega toka konvergira k limitni vrednosti $32,4 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$. Temperaturna razlika ob limitni vrednosti je 11,6 K. Na podlagi rezultatov prikazanih na sliki 18

izračunamo:

$$\lambda = \frac{q * d}{\Delta T} = \frac{32,4 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} * 0,05\text{m}}{11,6 \text{ K}} = 0,14 \frac{\text{W}}{\text{mK}}. \quad (7)$$

Deklarirana toplotna prevodnost porobetona v popolnoma suhem stanju je $0,120 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$. Od izmerjene toplotne prevodnosti se razlikuje za $0,02 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$, to je za 14 %. Razlika je večja od ocenjene merilne napake, zato sklepamo, da je večja izmerjena toplotna prevodnost posledica vlage v zračno suhem preizkušancu.

6.3.1 Vpliv vlažnosti na toplotno prevodnost porobetona

Zato, da bi lahko izračunali toplotno prevodnost navlaženega vzorca porobetona, smo morali preprečiti uhajanje vode iz preizkušanca. Odločili smo se, da bomo preizkušanec testirali v paroneprepustni vreči. Zavedali smo se, da vreča vpliva na toplotni tok, nismo pa vedeli v kolikšni meri. Zato smo ponovno izvedli meritve z vrečo na porobetonskem preizkušancu v zračno suhem stanju. Podobno smo naredili meritve še za 4 različne vlažnosti preizkušanca: prisilno posušenem v sušilnici, navlažen s 30 ml vode, navlažen s 100 ml vode in v popolnoma zasičenem stanju. Slika 19 prikazuje fotografijo preizkušanca med meritvijo.

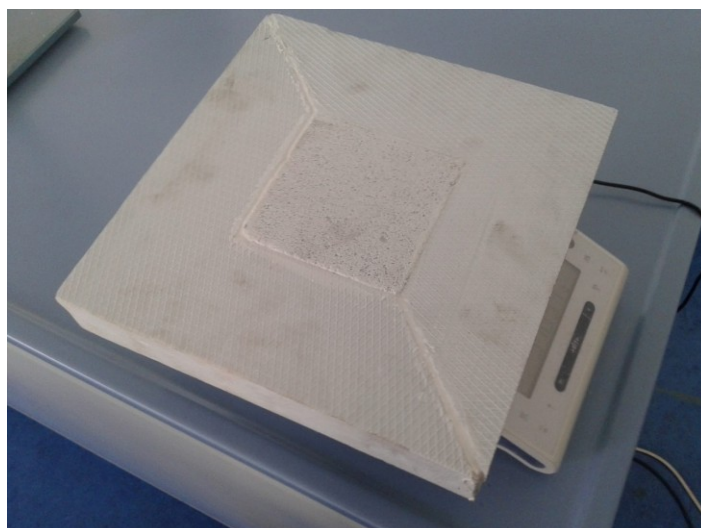


Slika 19: Porobetonski preizkušanec ovit v vrečo.

Prisilno posušen preizkušanec smo sušili 24 ur v dobro ventilirani peči pri 105 - 110 °C. Preizkušanca navlažena s 30 in 100 ml vode smo navlažili z brizgo. Na površino preizkušanca smo v časovnih presledkih 5 minut dodajali 10 ml vode (slika 20) ter ju ponovno stehali (slika 21).



Slika 20: Navlaževanje porobetonskega preizkušanca



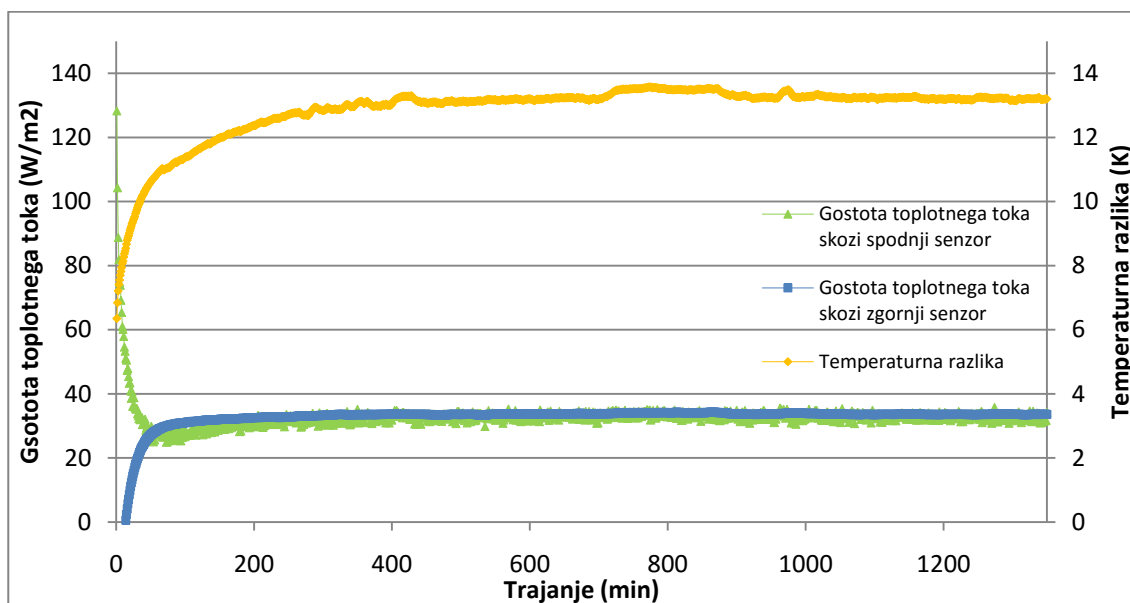
Slika 21: Tehtanje preizkušanca

Za zagotovitev popolnega navlaženja porobetonskega preizkušanca, smo ga pustili potopljenega v vodi čez noč (slika 22).

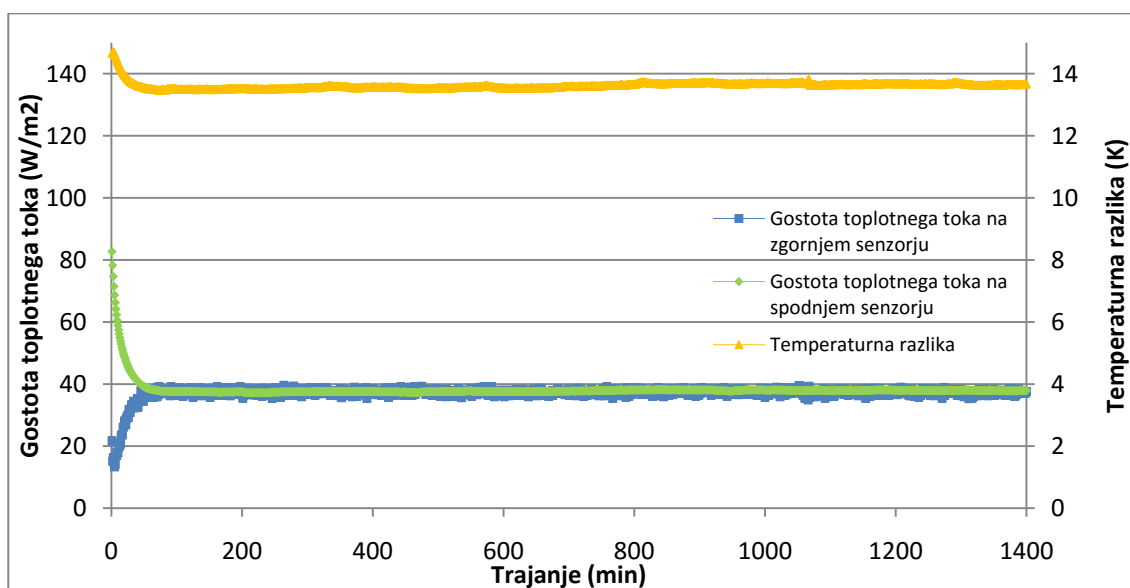


Slika 22: Namakanje porobetonskega preizkušanca

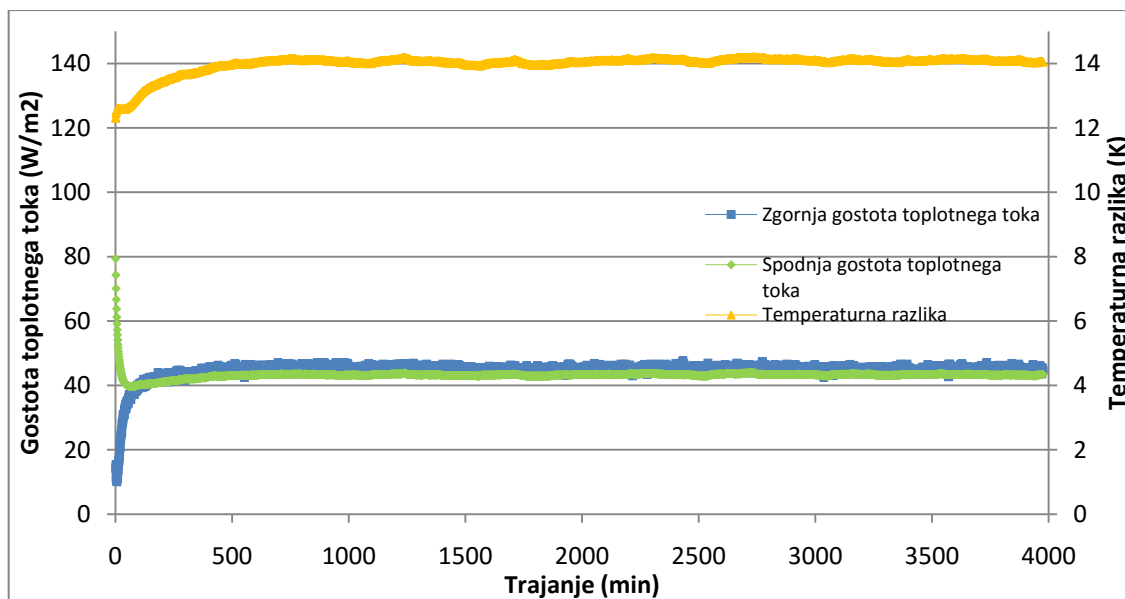
Naslednji dan smo vzorec površinsko pobrisali in stehali. Meritve (slike 23-27) in rezultati so zbrani v preglednici 2 in grafu na sliki 28.



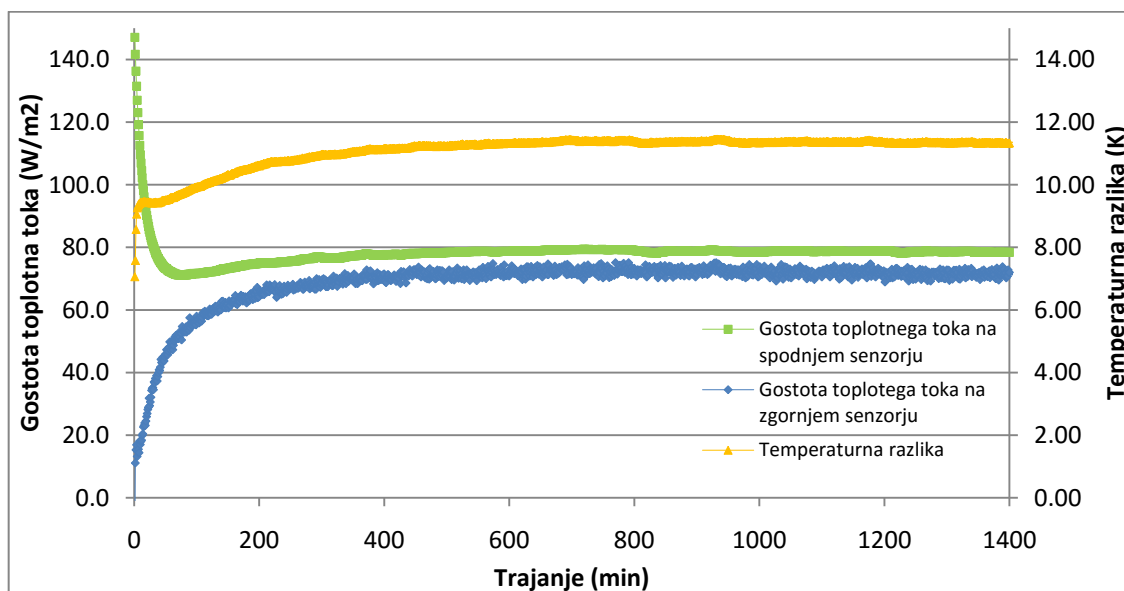
Slika 23: Prisilno posušen porobetonski preizkušane



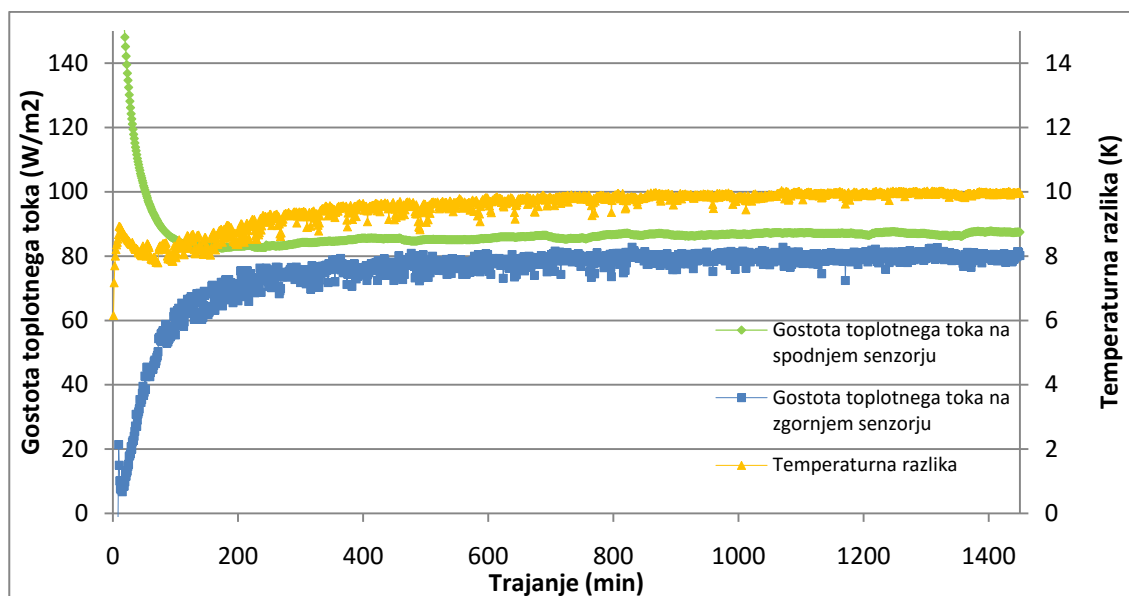
Slika 24: Zračno vlažen porobetonski preizkušane



Slika 25: Porobetonski preizkušaneec navlažen s 30 ml vode



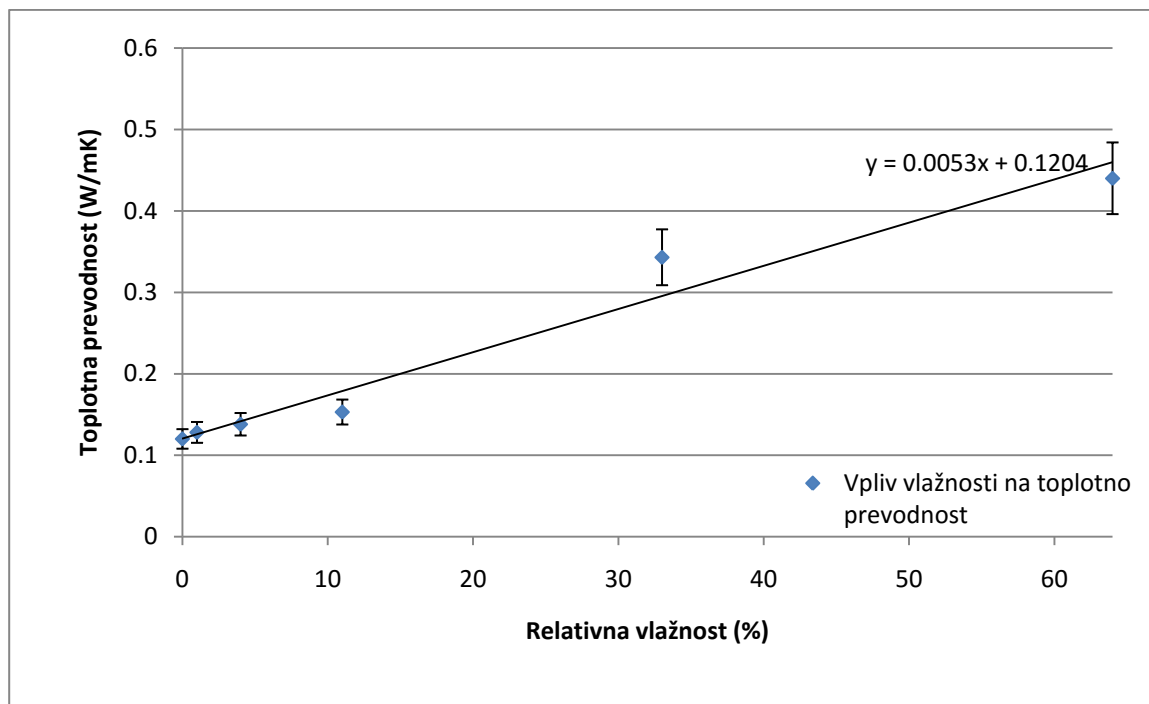
Slika 26: Porobetonski preizkušaneec navlažen s 100 ml vode



Slika 27: Popolnoma zasičen porobetonski preizkušaneč

Preglednica 2: Izračun relativne vlažnosti in toplotna prevodnost različno vlažnih preizkušancev.

Tip preizkušanca	Masa preizkušanca (g)	Masa vode v preizkušancu (g)	Relativna vlažnost (%)	Toplotna prevodnost ($\frac{W}{mK}$)
Prisilno posušen	413,01	0	0	0,13
Zračno vlažen	431,53	18,52	4	0,14
Navlažen s 30 ml vode	456,75	43,74	11	0,15
Navlažen s 100 ml vode	548,16	135,15	33	0,34
Zasičen	678,08	266,07	64	0,44



Slika 28: Izmerjena korelacija med toplotno prevodnostjo in relativno vlažnostjo porobetona

Trendna linija (slika 28) nam poda grobo oceno toplotne prevodnosti v odvisnosti od relativne vlažnosti. Relativno vlažnost RH v enačbo (8) moramo vstaviti v odstotkih. Enačba trendne linije je:

$$\lambda = (0,0053 RH + 0,12) \frac{W}{mK}. \quad (8)$$

7 ZAKLJUČEK

Pripravili smo merilnik za merjenje toplotne prevodnosti homogenih gradbenih materialov. Na podlagi ocene natančnosti izmerjenih količin pri meritvi (debelina vzorca, toplotni tok, temperatura) in primerjave izmerjenih vrednosti toplotne prevodnosti z vrednostmi pridobljenih v umerjenih merilnikih na istih vzorcih, ocenjujemo, da naš merilnik izmeri toplotno prevodnost λ na 10 % natančno.

Ugotovili smo tudi, da toplotna prevodnost porobetona raste približno linearno z relativno vlažnostjo.

V nadaljnjih raziskavah bomo izpopolnili tehniko vlaženja vzorca, z namenom čim bolj enakomerne navlažitve. Hkrati bomo poskušali doseči, da bo uhajanje toplote čim manjše.

VIRI

- [1] Medved, S. 2010. Gradbena Fizika. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo: 320 str.
- [2] SIST EN 12667:2002. Toplotne karakteristike gradbenih materialov in proizvodov – Ugotavljanje toplotne upornosti z zaščiteno vročo ploščo in/ali merilniki toplotnih tokov . Proizvodi z visoko ali srednjo toplotno upornostjo.
- [3] SIST EN 12939:2001. Toplotne značilnosti gradbenih materialov in proizvodov – Ugotavljanje toplotne upornosti s ščiteno ploščno napravo in z napravo z merilniki gostote toplotnega toka- Izdelki velike debeline z visoko in srednje visoko toplotno upornostjo .
- [4] SIST EN 12664:2002. Toplotne karakteristike gradbenih materialov in proizvodov – Ugotavljanje toplotne upornosti z zaščiteno vročo ploščo in/ali merilniki toplotnih tokov – Suhi ali vlažni proizvodi s srednjo ali nizko toplotno upornostjo.
- [5] Dell’Isola, M., d’Ambrosio Alfano, F.R., Giovenco, G. et al., I. 2012. Experimental Analysis of Thermal Conductivity for Building Materials Depending on Moisture Content, Int J Thermophys (2012) 33: 1674. doi:10.1007/s10765-012-1215-z.
- [6] Cussons Technology 2017. Tehnične specifikacije merilnika toplotne prevodnosti Cusson P5687. <http://www.cussons.co.uk/admin/resources/p5687-issue-3.pdf> (Pridobljeno 14. 5. 2017)
- [7] Katalog izdelkov NETZSCH s tehničnimi podatki, 2017.
<https://www.netzsch-thermal-analysis.com/en/products-solutions/thermal-diffusivity-conductivity/hfm-436-lambda> (Pridobljeno 6. 5. 2017)
- [8] Strnad, J. 2016 (2. izdaja). Fizika 1. del. Ljubljana, DMFA - založništvo: 344 str.

- [9] Ochs F., Müller-Steinhagen, I. 2005. Proceedings of NATO Advanced Study Institute on Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption, TESSEC, Izmir, Cesme, 2005
- [10] Zach J., Brozovsky J., Sedlarova I., 1, 2008. Proceedings of the 9th International Conference on NDT of Art, Jerusalem, Israel.
- [11] R-vrednost gradbenih materialov = R-values of Building Materials. 2017.
<https://sustainabilityworkshop.autodesk.com/buildings/insulation> (Pridobljeno 6. 4. 2017)
- [12] Vakuumske PVC vreče 2017.
<https://www.hofer.si/sl/posebna-ponudba/posebna-ponudba-od-ponedeljka-10-4-2017/produkt-detailseite/ps/p/easy-home-vakuumska-vreca-za-shranjevanje-1/>
(Pridobljeno 6. 5. 2017)
- [13] Katalog izdelkov YTONG s tehničnimi podatki. 2016.
https://www.ytong.si/si/docs/katalog_izdelkov_2016-4.pdf (Pridobljeno 6. 5. 2017)
- [14] FIBRANxps - tehnični podatki. 2017.
<http://www.fibran.si/files4users/files/brochures/SI01.pdf> (Pridobljeno 6. 5. 2017)