Izrada i baždarenje aprature za određivanje toplinskih svojstava materijala

Zukić, Šejla

Undergraduate thesis / Završni rad

2015

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Chemical Engineering and Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:149:780181

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-05-13**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Chemical Engineering and Technology University of Zagreb

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE

SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Šejla Zukić

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, rujan 2015. g.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE

SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Šejla Zukić

IZRADA I BAŽDARENJE APARATURE ZA ODREĐIVANJE TOPLINSKIH SVOJSTAVA MATERIJALA

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada: izv. prof. dr. sc. Juraj Šipušić

Članovi ispitnog povjerenstva:

izv. prof. dr. sc. Juraj Šipušić
izv. prof. dr. sc. Jasna Prlić Kardum
izv. prof. dr. sc. Nevenka Vrbos

Zagreb, rujan 2015. g.

Zahvaljujem se mentoru izv. prof. dr. sc. Šipušiću na iznimnom strpljenju, zalaganju i pomoći prilikom izrade ovog završnog rada.

Hvala i Sandri za lektoriranje.

SAŽETAK RADA

Ispitivanje toplinskih svojstava materijala često se provodi metodama koje su dugotrajne i većinom nepristupačne. Cilj ovog rada je bio osmisliti aparaturu pomoću koje će se na jednostavan način utvrditi neko toplinsko svojstvo materijala. Osnovna aparatura korištena u eksperimentu nadograđena je verzija aparature koja je korištena u prethodnim istraživanjima na Zavodu za anorgansku tehnologiju i nemetale, odnosno korišten je još jedan Peltierov element.

Rezultati mjerenja su kvalitativnog karaktera, odnosno može se usporediti toplinska vodljivost različitih materijala ili istog materijala različitih debljina. Zbog nedostatka iskustva i vremena nije napravljen matematički model pomoću kojeg bi mogli dobiti i kvantitativni rezultat.

Ključne riječi: toplinska svojstva, Peltierov element, toplinska vodljivost

SUMMARY

Testing thermal properties of materials are often performed by methods that are long-lasting and most inaccessible. The aim of this study was to design an apparatus which will help with easy determination of thermal properties of the material. The basic apparatus used in experiment is a upgraded version of apparatus that was used in previous studies in the Department of Inorganic technology and non-metals in which is added one more Peltier element.

The measurement results are qualitative character and can be used to compare the thermal conductivity of different materials or the same material of varying thickness. Due to lack of experience and time, we haven't made a mathematical model with which we could get also a quantitative result.

Key words: Peltier element, thermal properties, thermal conductivity

SADRŽAJ

1. UVOD 1
2. TEORIJSKI DIO 2
2.1. TEMPERATURA 2
2.2. TOPLINA 3
2.3. TOPLINSKI KAPACITET 3
2.4. SPECIFIČNI TOPLINSKI KAPACITET 3
2.5. TOPLINSKI TOK 3
2.6. TOPLINSKA DIFUZIVNOST 4
2.7. TOPLINSKA EFUZIVNOST 4
2.8. PRIJENOS TOPLINE 4
2.8.1. Kondukcija 5
2.8.2. Konvekcija 6
2.8.3. Radijacija 6
2.9. TOPLINSKA VODLJIVOST 6
2.10. METODE MJERENJA TOPLINSKE VODLJIVOSTI 7
2.10.1. Metode u ustaljenom stanju 7
2.10.2. Metode sa radijalnim tokom topline 8
2.10.3. Dinamičke metode 8
2.11. LASER FLASH METODA 9
2.12. SEEBACKOV EFEKT 11
2.13. PELTIEROV EFEKT 11
2.13.1. Pelierov element 12
3. EKSPERIMENTALNI DIO 14
3.1. APARATURA 14
3.1.1. Peltierov element 14
3.1.2. Ponor topline (heat sink) 14
3.1.3. Handyscope-HS3 15
3.1.4. Siglent SPD3303s 15
3.1.5. Prijenosno računalo 16
3.2. UZORCI ZA ISPITIVANJE 16
3.3. NAČIN ISPITIVANJA 17

4. REZULTATI 19
4.1. Ponovljivost mjerenja 19
4.2. Utjecaj debljine uzorka 21
4.3. Utjecaj vremena pobude strujom 23
4.4. Utjecaj debljine materijala na kašnjenje odziva 24
4.5. Utjecaj jakosti struje pobude na odziv 26
4.6. Pobuda i odziv prilikom direktnog kontakta dva Peltierova elementa 27
4.7. Izgled krivulje odziva i pobude za materijale slabe toplinske vodljivosti 28
4.8. Usporedba odziva dva različita materijala iste debljine 30
5. RASPRAVA 32
5.1. Ponovljivost mjerenja 33
5.2. Utjecaj debljine uzorka 34
5.3. Utjecaj vremena pobude strujom 34
5.4. Utjecaj debljine materijala na kašnjenje odziva 35
5.5. Utjecaj jakosti struje 35
5.6. Pobuda i odziv prilikom direktnog kontakta dva Peltierova elementa 35
5.7. Izgled krivulje pobude i odziva za materijale slabe toplinske vodljivosti 35
5.8. Usporedba odziva dva različita materijala iste debljine 36
6. ZAKLJUČAK 37
7. LITERATURA 38
8. POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA KORIŠTENIH U RADU 39
9. ŽIVOTOPIS 40

1. UVOD

U svakodnevnom radu inženjera u praksi, te u znanstveno-istraživačkom radu, često se javlja potreba za određivanjem toplinskih svojstava materijala odnosno proizvoda.

Toplinska svojstva materijala odlučujuća su za određenu primjenu, te uz druge konstrukcijske izvedbe osiguravaju primjerice dobro hlađenje mikroprocesora računala ili dobru izolaciju hladnjaka i stambenog prostora. Toplinska svojstva materijala također govore o kvaliteti proizvoda i ujednačenosti procesa proizvodnje, primjerice izolacijskog materijala - ekspandiranog polistirena. Iako je do podataka o toplinskim svojstvima materijala moguće doći na internetu ili u priručnicima, najveća poteškoća je zapravo pitanje o točnom sastavu ili čistoći materijala od interesa u odnosu na svojstva i sastav (udio primjesa, mikrostrukturu, poroznost) ispitanog materijala odnosno publicirane vrijednosti. U slučaju materijala koji su po svojoj prirodi promjenjivog sastava i heterogeni, primjerice stijene i beton, ili anizotropni, primjerice drvo i kristali, odnosno u slučaju poroznih, djelomično zasićenih materijala, publicirane se vrijednosti dosta razlikuju. Kako bi se došlo do traženog podatka, određenog toplinskog svojstva: toplinske vodljivosti (λ / $Wm^{-1}K^{-1}$), toplinske difuzivnosti (a / m^2s^{-1}), ili specifičnog toplinskog kapaciteta (c / $Jkg^{-1}K^{-1}$) potrebno je ispitati uzorak materijala od interesa.

Za mjerenje određenog toplinskog svojstva (ili istodobno mjerenje dva toplinska svojstva) razvijen je niz metoda ispitivanja od kojih su neke i prihvaćene kao međunarodne standardne metode (ASTM, EN, ISO), a na tržištu su dostupni brojni instrumenti/uređaji renomiranih proizvođača mjerne opreme koji služe za navedenu namjenu. Odabir odgovarajuće mjerne metode ovisi i o agregatnom stanju uzorka, količini uzorka te o rasponu temperatura u kojem je potrebno odrediti tražena toplinska svojstva, primjerice kriogene temperature manje od -40 °C ili temperature više od 800 °C.

Cilj je ovog rada ispitati mogućnost izrade jednostavne i jeftine aparature za mjerenje toplinskih svojstava krutih materijala. U tom smislu, ovaj je rad nastavak rada na Zavodu za anorgansku kemijsku tehnologiju i nemetale, gdje je uporabljen Peltierov element i za pobudu i kao senzor promjene temperature.

2. TEORIJSKI DIO

2.1. TEMPERATURA

Temperatura je stupanj zagrijanosti nekog tijela i ovisi o tome koliko unutarnje energije sadrži neko tijelo određene mase i tlaka. Temperatura je u uskoj vezi s prosječnom brzinom molekula. Budući da je to veličina kojom se mjeri odstupanje od toplinske ravnoteže, potrebno je znati da dva tijela, A i B, u trenutku toplinske ravnoteže imaju izjednačene temperature. Temperatura je intenzivna fizikalna veličina što znači da se ne može mjeriti direktno već se mjeri posredno. [1]

Mjerenje temperature se zasniva se sljedećim eksperimentalnim činjenicama:

1. Dva sustava koja su u termičkoj ravnoteži sa trećim, također su u termičkoj ravnoteži jedan sa drugim (nulti zakon termodinamike).
2. Promjena temperature je uvijek u nekoj mjeri popraćena promjenom jednog ili više parameta koji karakteriziraju taj toplinski sustav.

Te činjenice ukazuju da posredno mjerenje temperature podrazumijeva usporedbu temperature dotičnog tijela u nekom trenutku s nekom lako mjerljivom veličinom.

Danas se koriste tri temperaturne skale: Celzijus, Farenheit i Kelvin. A. Celsius je 1794. godine uveo celzijusovu skalu na temelju podjele temperaturnog intervala između ledišta i vrelišta obične vode, pri standardnom atmosferskom tlaku, na 100 dijelova. Za ledište je uzeo 0°C, a za vrelišta 100°C. Farenheitovu skalu je 1714. godine predložio G.D. Farenheit prema kojoj voda vrije pri 212, a zamrzava pri 32 stupnjeva Farenheita te je interval između te dvije temperature podijeljen na 180 dijelova. Međunarodni sustav mjernih jedinica (SI) za mjernu jedinicu temperature propisuje Kelvin (K) prema Kelvinovoj ili apsolutnoj temperaturnoj skali. Apsolutna temperaturna skala za svoju početnu točku uzima apsolutnu nulu, a to je temperatura pri kojoj kinetička energija molekula im minimalnu vrijednost. Ledište čiste vode pri tlaku od 760 mmHg iznosi 273,15 K.

Postoje različiti uređaji za mjerenje temperature (termometri). U svakodnevnici su najčešće korišteni termometri punjeni kapljevinom (živa, alkohol), no još se koriste i termometri koji rade na principu mjerenja promjene neke fizikalne veličine u ovisnosti o temperaturi (bimetalni, tlačni, otporni, električni termometri itd.) [2]

2.2. TOPLINA

Za razliku od temperature, toplina je energija vezana uz gibanje čestice u tvari te je zapravo dio unutarnje energije koji prelazi s jednog tijela na drugo pri izjednačavanju njihovih temperatura.

Za objašnjavanje i shvaćanje topline i popratnih promjena koristi se kinetičko-molekularna teorija. Kinetičko-molekularna teorija zasniva se na dokazanoj tvrdnji o neprekidnom, stohastičkom i konfuznom gibanju molekula. Na makroskopskoj razini sve se molekule gibaju, neovisno o njihovom agregatnom stanju. Do gibanja molekula dolazi zbog njihove kinetičke energije koja je u direktnoj vezi sa toplinom. Što je veća toplina koju je molekula primila, veća je i kinetička energija molekule, a u skladu sa tim i prosječna brzina molekule. [3]

2.3. TOPLINSKI KAPACITET

Toplinski kapacitet, C [kJ/K], je fizikalna veličina koja pokazuje koliko topline treba nekomu tijelu dovesti da mu se temperatura povisi za 1 K (1°C), odnosno označava sposobnost tijela da akumulira toplinu. Definira se kao omjer količine topline Q [J] i promjene temperature ΔT [K]:

$$C = \frac{Q}{\Delta T} \text{ [J/K]} \tag{1}$$

Razlikujemo toplinski kapacitet pri stalnom tlaku i toplinski kapacitet pri stalnom volumenu. Toplinski kapacitet je proporcionalan masi tijela, odnosno što je masa veća, veći je i toplinski kapacitet. [4]

2.4. SPECIFIČNI TOPLINSKI KAPACITET

Specifični toplinski kapacitet, c, materijala definira se kao toplina koja je potrebna da se jednom kilogramu tog materijala povisi temperatura za 1 kelvin (ili stupanj celzijusa):

$$c = \frac{C}{m} = \frac{Q}{m\Delta T} \text{ [J/kgK]} \tag{2}$$

Vrijednost specifičnog toplinskog kapaciteta različita je za različite vrste materijala i uvelike ovisi o temperaturi pri kojoj je izmjerena.[9]

2.5. TOPLINSKI TOK

Toplinski tok, Φ, je količina topline prenešena u jedinici vremena Δt, a definirana je izrazom (3):

$$\Phi = \lambda \times A \times \frac{\Delta t}{\Delta x} \tag{3}$$

gdje je λ toplinska vodljivost, A površina tijela. [5]

2.6. TOPLINSKA DIFUZIVNOST

Toplinska difuzivnost (koeficijent temperaturne vodljivosti), a [m^2s^{-1}] definira brzinu promjene temperature i može se izračunati preko izraza (4):

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \tag{4}$$

Izraz (4) ukazuje da toplinska difuzivnost ovisi o koeficijentu toplinske vodljivosti, λ [W/mK], gustoći ρ [kg/m^3] te o specifičnom toplinskom kapacitetu c [J/kgK].

Temperaturna vodljivost materijala veća je što je brzina promjene temperature veća. Općenito se može reći da fluidi imaju malu, a metali veliku toplinsku difuzivnost. [6]

2.7. TOPLINSKA EFUZIVNOST

Toplinska efuzivnost, e [$Ws^{1/2}m^{-2}K^{-1}$] predstavlja sposobnost akumuliranja topline u vremenu t kod materijala nevisno o tome u kojem se agregatnom stanju nalazi. Kada se dva elementa različitih temperatura dodiruju, brzina prijelaza topline definirana je toplinskom efuzivnosti. Dana je preko izraza (5):

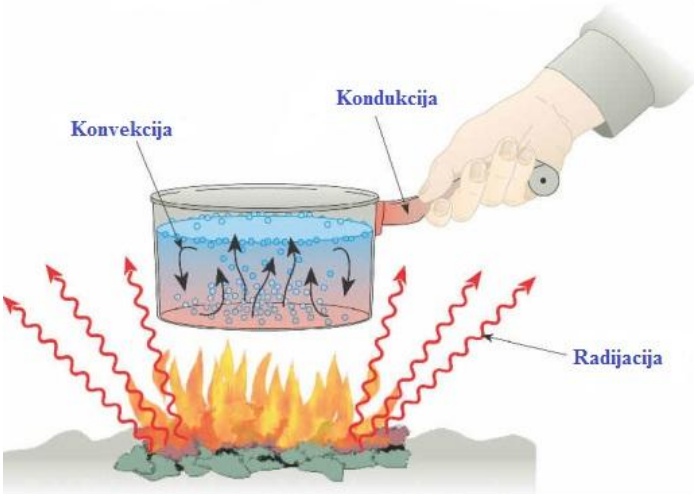
$$e = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c} \tag{5}$$

gdje je λ toplinska vodljivost, ρ gustoća materijala, a c specifični toplinski kapacitet. [7]

2.8. PRIJENOS TOPLINE

Toplina se može prenositi sa jednog tijela na drugo samo ako postoji razlika u temperaturi. Prema drugom zakonu termodinamike, toplina će se prenositi sa toplijeg na hladnije tijelo sve dok se ne uspostavi termodinamička ravnoteža. Prema tome, pokretačka sila za proces prijenosa topline je razlika u temperaturi. Ukoliko nema promjene temperaturnog gradijenta sa vremenom, proces je stacionaran ($\left(\frac{\left(\frac{dT}{dy}\right)}{dt}\right) = 0$), a nestacionaran ukoliko postoji ovisnost ($\left(\frac{\left(\frac{dT}{dy}\right)}{dt}\right) \neq 0$). Intenzitet prijenosa ovisi o temperaturnom gradijentu, otporima te o površini izmjene topline.

Postoje tri osnovna načina prijenosa topline: konvekcija, kondukcija i radijacija (toplinsko zračenje). U realnim sustavima nikad nije prisutan samo jedan način prijenosa. [8]



Slika 1. *Prikaz mehanizama prijenosa topline* [9]

2.8.1. Kondukcija

Kondukcija ili toplinsko provođenje je molekularni mehanizam prijenosa topline karakterističan za čvrsta tijela i fluide u mirovanju. Direktnim kontaktom čestica tvari te ukoliko postoji temperaturni gradijent, dolazi do prijenosa topline molekularnom interkacijom zbog prisustva slobodnih elektrona. Budući da više temperature odgovaraju višim nivoima, energija se prenosi u smjeru opadajuće temperature.

Kondukcija je ovisna o fizikalnim svojstvima materijala, geometrijskim karakteristikama te o lokalnim razlikama u temperaturi. Može biti stacionarna ili nestacionarna, ovisno o tome postoji li promjena temperaturnog gradijenta s vremenom. Prijenos topline kondukcijom u čvrstim tijelima opisuje se I. Fourierovim zakonom:

$$q = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \tag{6}$$

Za nestacionaran proces i provođenje topline u smjeru x, y i z vrijedi II. Fourierov zakon:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T \tag{7}$$

U odnosu na konvekciju i radijaciju, kondukcija je spor proces. [8]

2.8.2. Konvekcija

Konvekcija je vrtložni mehanizam prijenosa topline karakterističan za fluide. Osim što podrazumjeva izmjenu u masi fluida, konvekcijom dolazi i do izmjene između fluida i čvrste površine. Način na koji će se odvijati konvekcija ovisi o fizikalnim svojstvima promatranog sustava (koeficijent toplinske vodljivosti, specifični toplinski kapacitet, koeficijent temperaturne vodljivosti, gustoća i dinamička viskoznost), geometrijskim karakteristikama (veličini i obliku površine) te o hidrodinamičkim karakteristikama.

Ovisno o tome kako je izazvana struja zagrijanog fluida, konvekcija može biti prirodna (npr. širenje toplog zraka s radijatora po sobi) ili prisilna (izazvana vanjskom silom, npr. širenje pomoću ventilatora). Prirodna konvekcija bit će manjeg intenziteta od prisilne konvekcije. [8]

2.8.3. Radijacija

Radijacija (zračenje) nastaje zbog temperature samog tijela. Čvrsta tijela apsorbiraju i reflektiraju energiju svih valnih duljina, odnosno daju kontinuirani spektar, dok plinovi daju linijski spektar jer apsorbiraju ili reflektiraju svjetlost određene valne duljine. Za radijaciju nije potreban medij, štoviše on ju usporava. Dovođenjem temperature dolazi do kretanja atoma i molekula koji su sastavljeni od nabijenih čestica što uzrokuje nastanak elektromagnetskog zračenja koje odvodi energiju od površine. Elektromagnetski valovi nastali zračenjem nalaze se uglavnom u infracrvenom dijelu spektra, te mogu prolaziti kroz većinu sredstava pa čak i kroz vakuum. Elektromagnetsko zračenje prenosi se brzinom svjetlosti, $c = 3*10^8$ ms^{-1}. Tijelo može toplinsko zračenje apsorbirati, reflektirati ili propustiti, a za promjenu temperature odgovoran je apsorbirani dio. [8]

2.9. TOPLINSKA VODLJIVOST

Najvažnija veličina za kvantificiranje prijenosa topline kroz materijal je toplinska vodljivost, λ [W/mK]. Ona je numerički jednaka količini topline koja prolazi kroz jediničnu izotermnu površinu u jediničnom vremenu pri jediničnom temperaturnom gradijentu i mjera je sposobnosti čvrstog tijela da vodi toplinu:

$$\lambda = \frac{Q}{A \cdot \Delta T} \cdot \frac{L}{t} \tag{8}$$

gdje je: λ - toplinska vodljivost [W/mK]

Q - količina topline [J]

A - poprečni presjek [m^2]

ΔT - razlika temperature [K]

L - debljina materijala [m]

t - vrijeme prolaza topline [s]

Određuje se eksperimentalno, a ovisi o temperaturi, tlaku i prirodi tijela. Ovisno o načinu prijenosa topline, koeficijent toplinske vodljivosti će se drugačije mijenjati s temperaturom. Porastom temperature koeficijent će opadati kod kapljevina i čistih metala, a rasti kod plinova i nemetala. Materijali s malom toplinskom vodljivosti nazivaju se izolatorima, a oni sa velikom vodljivosti su vodiči. [8]

Tablica 1. *Prikaz vrijednosti toplinske vodljivosti za različite materijale pri 25°C* [10]

Materijal	**Toplinska vodljivost, λ [W/mK]**
Aluminij	250
Čelik	46
Drvo	0,130
Staklo	1,050
Voda	0,580
Zrak	0,024

2.10. METODE MJERENJA TOPLINSKE VODLJIVOSTI

2.10.1. Metode u ustaljenom stanju

Metode u ustaljenom stanju temelje se na Fourierovom zakonu prijenosa topline koji je dan izrazom (9):

$$Q = \lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{L} t \tag{9}$$

gdje je: λ - toplinska vodljivost [W/mK]

Q - količina topline [J]

A - poprečni presjek [m^2]

ΔT - razlika temperature [K]

L - debljina materijala [m]

t - vrijeme prolaza topline [s]

2.10.1.1. Metoda zaštićene vruće ploče (eng. guarded hot plate)

Metoda zaštićene vruće ploče je široko korištena metoda za određivanje toplinske vodljivosti materijala koji su loši vodiči topline (λ < 1 W/mK). Prikaz metode obično izgleda kao sendvič sklop grijača između dva uzorka sa zaštićenom vrućom pločom postavljenom na simetričan način, što je nužno radi održavanja jednodimenzionalnosti toka topline. Nakon mjerenja, toplinska vodljivost se računa iz poznatog izvora topline Q, temperaturne razlike kroz uzorak ΔT te debljine uzorka L. [11]

2.10.2. Metode sa radijalnim tokom topline

Metode s radijalnim tokom topline pokazale su se vrlo uspješnim u određivanju koeficijenta toplinske vodljivosti čvrstih praškastih i zrnatih materijala. Uzorak je u obliku valjka s rupom u kojoj je smješteno središnje grijalo pri čemu je tok topline usmjeren prema središtu uzorka. Nakon postizanja ustaljenog stanja toplinska vodljivost se računa na temelju poznatog izvora topline Q, temperaturne razlike kroz uzorak ΔT i dimenzija uzorka. [12]

2.10.3. Dinamičke metode

Dok za metode u ustaljenom stanju mjerenje traje duže i ne omogućavaju mjerenje toplinske vodljivosti uzoraka koji sadrže vlagu, dinamičke metode su puno kraće te su pogodne za uzorke sa vlagom. Princip dinamičkih metoda se temelji na analizi temperaturnih odziva pri prijelaznim promjenama temperature.

2.10.3.1. Fitchova metoda

To je najčešće korištena metoda za mjerenje toplinske vodljivosti uzoraka malih dimenzija pri nestacionarnim uvjetima i nije primjenjiva za mjerenja na visokim temperaturama.

Fitchov uređaj se sastoji od izvora topline i ponora topline. Kao izvor topline koristi se posuda sa dobro vodljivim dnom koja je na konstantnoj temperaturi i izolirana sa svih strana. Za ponor topline služi blok od bakra, koji je također izoliran i jednom stranom okrenut prema posudi. Površine za prijenos topline su glatke kako bi se smanjio otpor. Uloge izvora i ponora topline su obrnute kada se posuda održava na temperaturi nižoj od one temperature bakrovog bloka. Posuda se najčešće održava na temperaturi od 20°C, a uzorak se prislanja na njeno dobro vodljivo dno i služi kao plošni izvor topline. Termoparovi

mjere temperaturu posude i bloka. Uz pretpostavka da je temperaturni profil linearan te da je akumulacija temperature u uzorku i kontaktni otpor između posude i bakrenog bloka zanemariv, izveden je sljedeći izraz (10):

$$ln\left(\frac{T_0-T_\infty}{T-T_\infty}\right)=\frac{\lambda A}{Lm_{Cu}\,c_{Cu}} \tag{10}$$

gdje je A - površina prijenosa topline (m^2), λ - toplinska vodljivost uzorka (W/mK), L - debljina uzorka (m), m_{Cu} - masa bakrenog bloka (kg), c_{Cu} - toplinski kapacitet bakra, (J/kgK), t - vrijeme, (s), T - temperature bakrenog bloka (°C), T_0 - početna temperatura (°C), T_∞ - temperatura dna posude (°C). Toplinska vodljivost izračuna se iz nagiba linearnog dijela grafa logaritma bezdimenzijske temperature u ovisnosti o vremenu. [12]

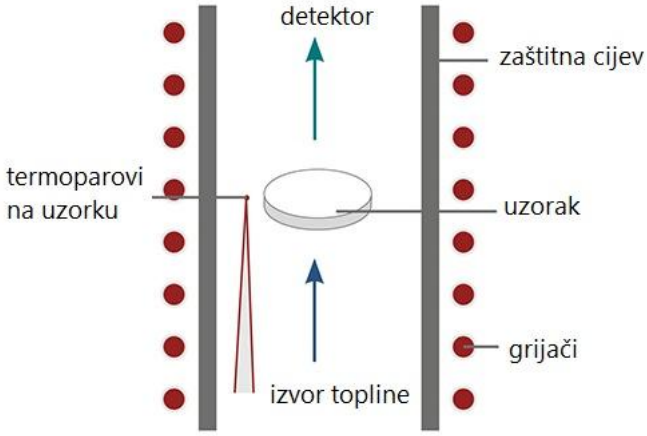
2.10.3.2. Metoda vruće žice (eng. hot wired method)

Metoda vruće žice koristi se za određivanje toplinskih svojstava krutina, prašaka i fluida do temperature od 1800 K. Ovom metodom, s manjom preciznošću, mogu se izmjeriti specifični toplinski kapacitet i toplinska difuzivnost. Duga tanka žica koja skuži kao izvor topline smještena je unutar uzorka i zagrijava se poznatom konstatnom snagom. Odziv temperature uzorka u vremenu povezan je s toplinskom vodljivosti.

Moguće su tri osnovne izvedbe: poprečne žice (eng. cross wire), otpornička žica (eng. resistive wire) i paralelne žice (eng. parallel wire). Metoda je primjenjiva za izotropne i anizotropne materijale. [12]

2.11. LASER FLASH METODA

Metoda pobude laserom datira iz 1961. godine te služi za određivanje toplinske difuzivnosti materijala, a zatim i ostalih toplinskih svojstava. Princip metode temelji se na kratkom zagrijavanju donje strane pločastog uzorka. Promjena temperature na gornjoj površini uzorka detektira se pomoću infracrvenog detektora.



Slika 2. *Pojednostavljeni prikaz aparature Laser Flash metode* [14]

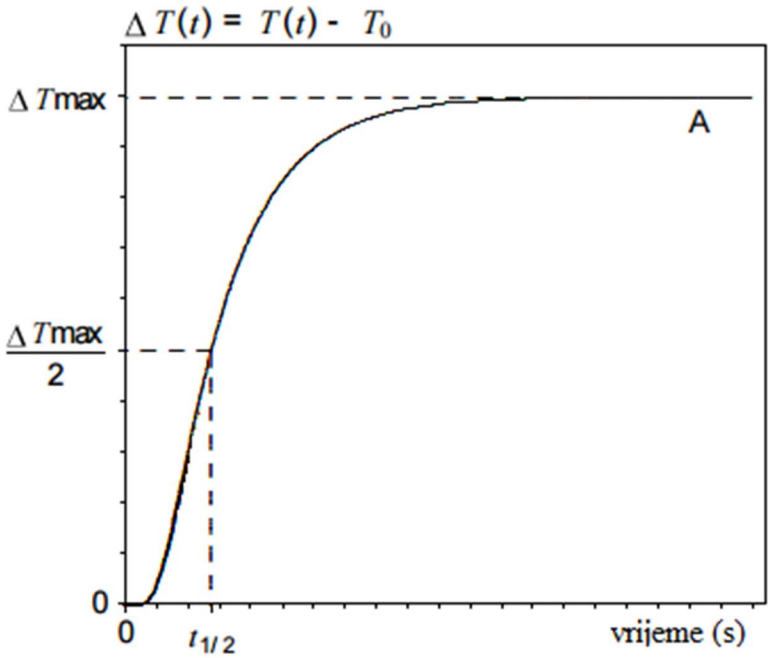
Toplinska difuzivnost određuje se iz termograma prikazanog na **slici 3.** preko izraza (11):

$$a = 0{,}1388 \cdot \frac{L^2}{t_{1/2}} \tag{11}$$

gdje je: a- toplinska difuzivnost, m^2s^{-1}

L- debljina uzorka, m

$t_{1/2}$- vrijeme polovine maksimuma krivulje, s.



Slika 3. *Prikaz termograma dobivenog mjerenjem pomoću Laser Flash metode* [15]

Budući da u izvornoj metodi Parker pretpostavlja izoterman i adijabatski uzorak (bez gubitka topline), odnosno idealne uvjete, ograničava njenu primjenu. Novije metode koje se temelje na Laser Flash-u uzimaju u obzir gubitak topline, nehomogenost strukture itd.

Prednost metode je njena brzina, točnost te mogućnost korištenja pri mjerenju toplinskih svojstava na višim temperaturama. [13]

2.12. SEEBACKOV EFEKT

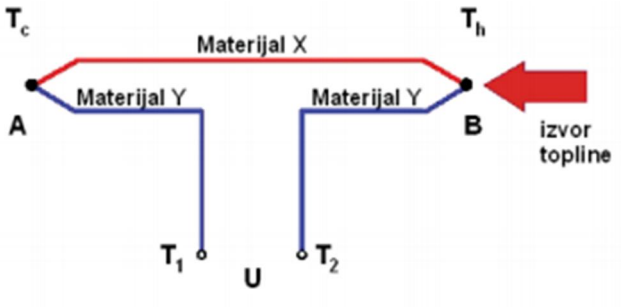
Njemački fizičar Thomas Johnson Seeback uočio je da se u zatvorenom krugu što ga tvore dva materijala javlja kontinuirana električna struja kada su spojišta ta dva metala na različitim temperaturama. Ako se ovaj krug prekine, napon otvorenog kruga (Seebackov napon) funkcija je temperature spojišta i sastava dvaju materijala koja se naziva termoelektična motorna sila. Razlika napona dva spojišta dana je izrazom (12): [16]

$$\Delta U = (\alpha_1 - \alpha_2)\Delta T = \alpha \Delta T \tag{12}$$

gdje je: ΔU - razlika napona, V

α - Seebackov koeficijent, VK^{-1}

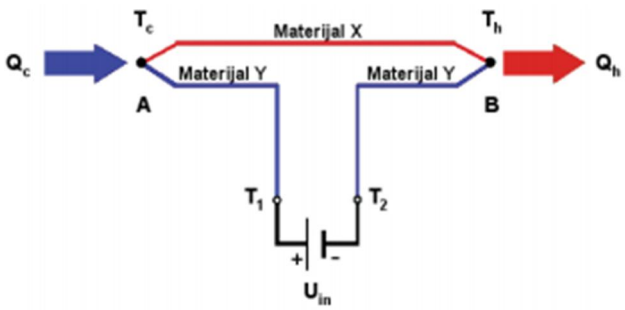
ΔT - razlika temperatura, K



Slika 4. *Shematski prikaz Seebackovog efekta* [16]

2.13. PELTIEROV EFEKT

Peltierov efekt spada u grupu termoelektričnih efekata. Prvi ga je opisao francuski fizičar Jean Peltier, a uočio pojavu koja se javlja na spojištima dvaju materijala spojenih u zatvorenu petlju ako kroz krug protiče električna struja. Spojišta će iz okoline primiti ili dati toplinu, odnosno poprimit će različitu temperaturu. Smjer struje definira koje će spojište imati višu ili nižu temperaturu, a o jakosti struje ovisi ravnotežna razlika temperatura. [16]



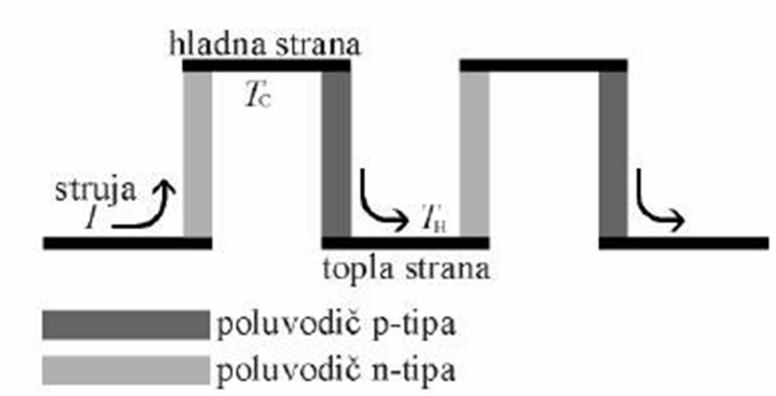
Slika 5. *Shematski prikaz Peltierovog efekta* [16]

2.13.1. Pelierov element

Peltierov element je termoelektrični uređaj koji se sastoji od velikog broja poluvodičkih kristala p- i n-tipa, a koji su u alternirajućem naizmjeničnom rasporedu poslagani između dva sloja keramike koji služe kao izolatori. Princip rada Peltierovog elementa temelji se na istoimenom efektu.

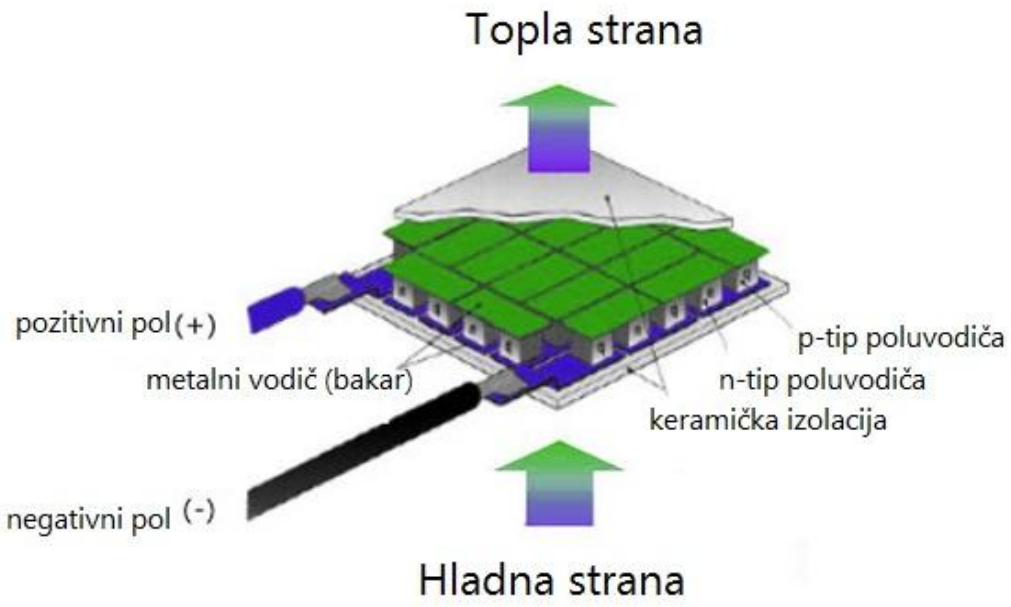
Povezivanjem Seebackovog i Peltierovog elementa može se ostvariti termoelektrični generator električne energije ili sklop za grijanje, odnosno hlađenje. Termoelektrici su materijali koji imaju takva svojstva.

Prilikom zagrijavanja jednog kraja poluvodiča, poluvodič n-tipa na toplom kraju ima manje elektrona nego na hladnijem, dok poluvodič p-tipa ima na toplijem kraju manje šupljina, pozitivnih nosilaca elektriciteta. Kada elektron iz metalnog vodiča prelazi na topliju stranu poluvodiča p-tipa, on mora nadoknaditi razliku u energiji, pa uzima toplinsku energiju od kristalne rešetke. Okretanjem smjera električne struje, elektroni će višak energije predavati rešetki. Zatim se slobodno kreću kroz metalni vodič prema hladnijoj strani. Da bi prešli u vodljivi pojas n-tipa poluvodiča, moraju apsorbirati energiju i zbog toga je taj dio poluvodiča hladniji. Kroz poluvodič n-tipa elektroni se kreću u vodljivom energetskom pojasu. Na kraju dolaze do drugog spoja metala i poluvodiča gdje su slobodni elektroni u vodljivom pojasu poluvodiča na višem energetskom nivou od Fermijevog nivoa metala, pa pri prijelazu u metal gube energiju. Zato se taj dio zagrijava.



Slika 6. *Shematski prikaz smjera struje i razlike u temperaturi dviju strana Peltierovog elementa* [17]

Kod Peltierovog elementa toplina se uvijek apsorbira na hladnoj strani p- i n-tipa poluvodiča. Kapacitet grijanja ili hlađenja proporcionalan je struji, a ovisi o geometrijskim dimenzijama, broju parova elemenata p-tipa i n-tipa poluvodiča i svojstvima korištenih materijala. [16-17]



Slika 7. *Shematski prikaz strukture Peltierovog elementa* [18]

3. EKSPERIMENTALNI DIO

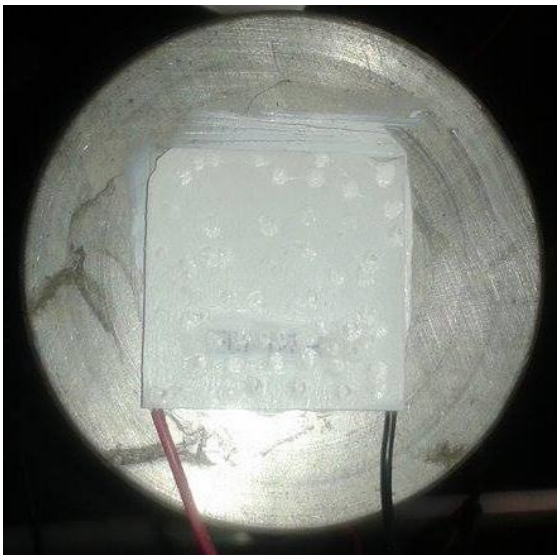
U eksperimentalnom dijelu analizirano je šest vrsta uzoraka pomoću aparature koja se nalazi na Zavodu za anorgansku tehnologiju i nemetale.

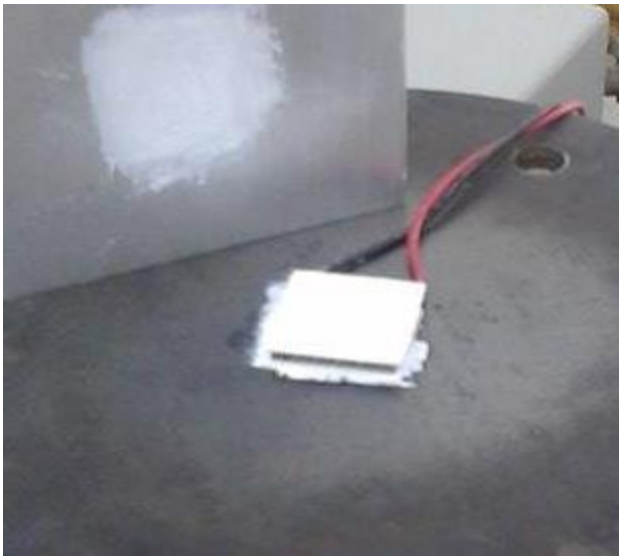
3.1. APARATURA

Aparatura je proširena verzija aparature koja je korištena za prethodna istraživanja na Zavodu. Sastoji se od sljedećeg:

3.1.1. Peltierov element

U eksperimentu smo koristili dva Peltierova elementa. Prva pločica koja je u kontaktu s ponorom topline i uzorkom je dimenzije 40x40x4 mm te je ona služila za pobudu istosmjernom strujom konstantne jakosti. Druga pločica se nalazi između uzorka i hladnjka. Dimenzije su 23x23x4 mm i ima ulogu senzora temperature.

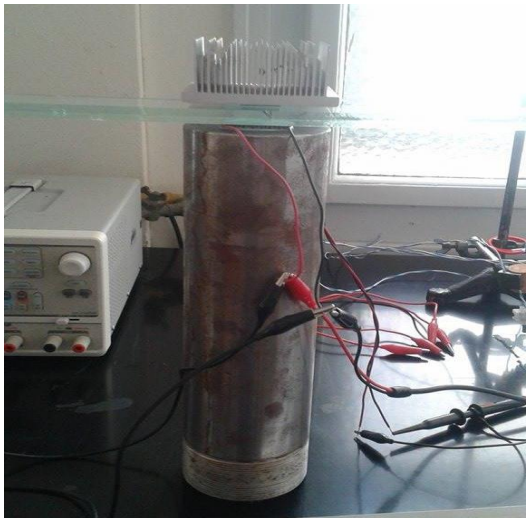




Slika 8. *Veliki Peltier (lijevo) i mali Peltierov element (desno) korišteni u mjerenju*

3.1.2. Ponor topline (heat sink)

Kao ponor topline korišten je masivni željezni valjak za kojeg je pretpostavljeno da je sobne temperature i da se tijekom ispitivanja njegova temperatura ni u kojem dijelu ne mijenja.



Slika 9. *Željezni valjak korišten kao ponor topline u mjerenju*

3.1.3. Handyscope-HS3

Handyscope-HS3 je računalno-kontrolirani mjerni instrument koji se može koristiti kao voltmetar, osciloskop, analizator spektra ili snimač prijelaza. Na takvom modelu instrumenta moguće je mjeriti dva sustava istovremeno. U ovom ispitivanju služio je kao mjerni instrument odziva u sustavu. [19]

Slika 10. *Handyscope korišten u ispitivanjima*

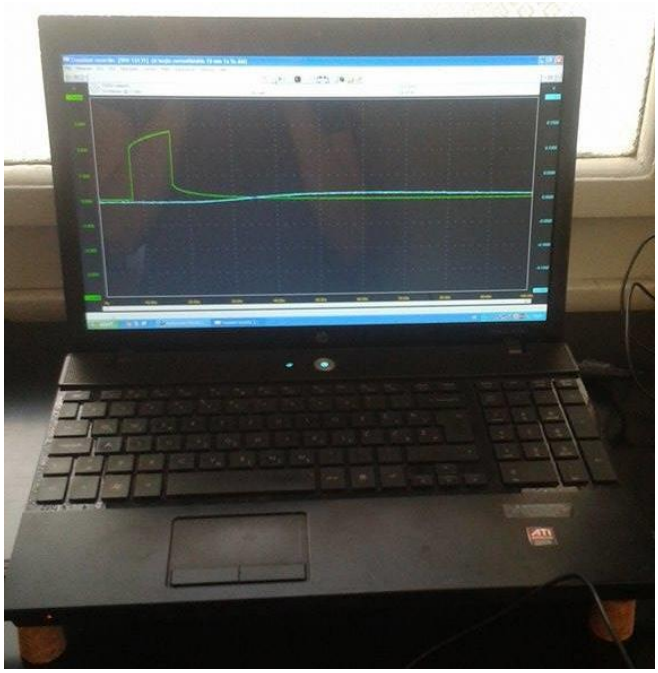
3.1.4. Siglent SPD3303s

SPD3303s je linearno programirano DC napajanje koje omogućuje trostruki izlaz. Osigurava visoku preciznost i ima prilagodljivo napajanje za različite spojeve eksperimenta. Za naše ispitivanje služio je za namještanje parametara pomoću kojih smo izveli pobudu na Peltierovom elementu. [19]

Slika 11. *SPD3303s korišten u ispitivanjima*

3.1.5. Prijenosno računalo

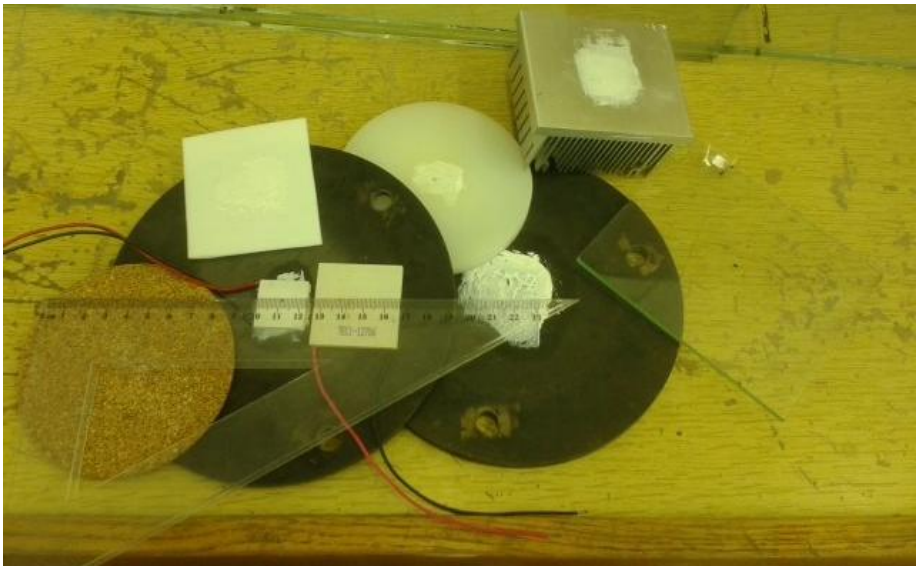
Pomoću računala obrađeni su podaci prikupljeni pomoću Handyscope-HS3.



Slika 12. *Prijenosno računalo korišteno za obradu podataka*

3.2. UZORCI ZA ISPITIVANJE

U eksperimentu je korišteno šest vrsta krutih uzoraka poznate debljine. Kao uzorci korišteni su: prozorsko staklo, keramika (Al_2O_3), metal (željezo), plastika, teflon i pluto.

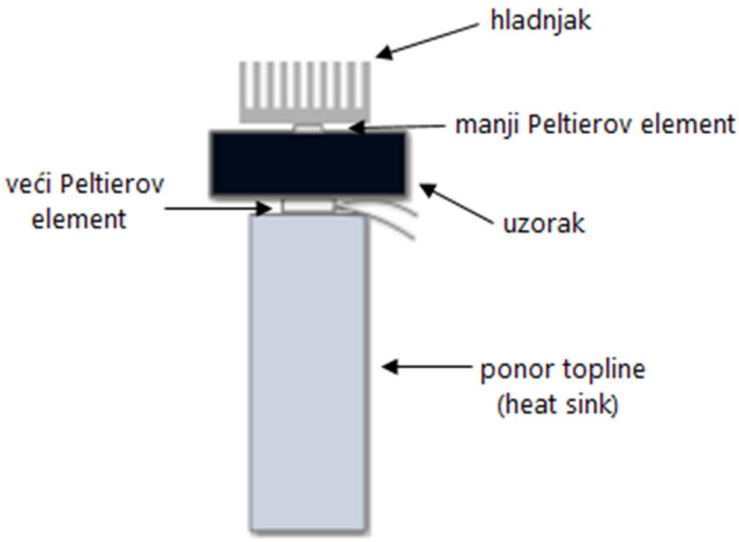


Slika 13. *Aluminijski hladnjak, Peltierovi elementi i uzorci korišteni u ispitivanjima*

3.3. NAČIN ISPITIVANJA

Na željezni valjak koji služi kao ponor topline zalijepi se veći Peltierov element pomoću toplinski vodljive paste. Na Peltierov element istom pastom zalijepi se uzorak na čiju gornju površinu se zalijepi manji Peltierov element (″sendvič″ sistem). Na manjeg Peltiera stavi se aluminijski hladnjak čiji je kontakt poboljšan toplinski vodljivom pastom.

Prilikom mjerenja moguće je mijenjati jakost struje, vrijeme trajanja pobude strujom te debljinu i vrstu uzorka.



Slika 14. *Shematski prikaz aparature korištene u eksperimentu*

Tablica 2. *Prikaz vrijednosti debljine uzroka, parametra struje i vremena pobude za različite materijale*

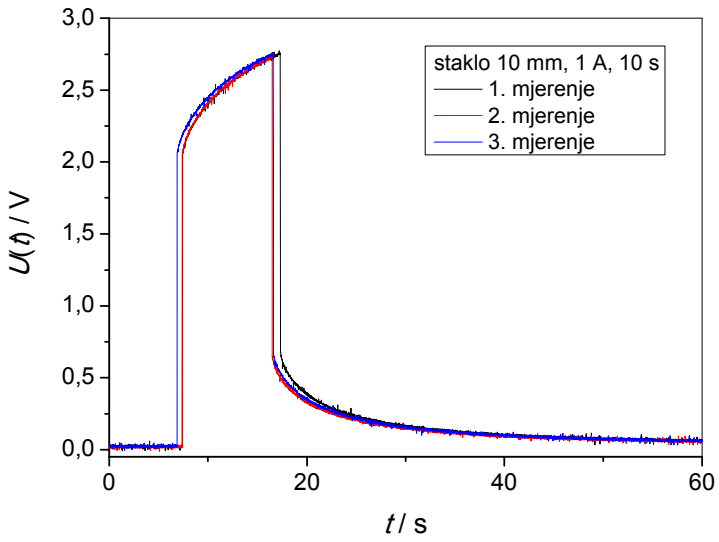
Uzorak	***L*/mm**	***t*/s**	***I*/A**
staklo	3,0	5 10 15	1,0
	4,0		
	5,0		
	8,0		
	10,0		
keramika	4,0	16	0,5
			0,85
			1,2
metal (Fe)	5,1	2	0,5
		4	
		6	
	8,1	8	1,0
		10	
		15	
teflon	2,1	15	0,5
	9,4	15	0,5
Plastika SP	8,2	30	1,0
Plastika O	2,0	15	1,0
Pluto	3,0	15	0,5

4. REZULTATI

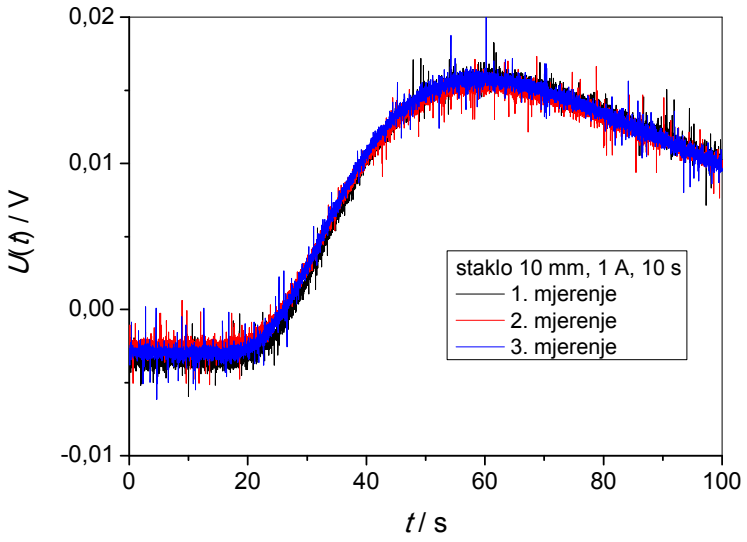
Budući da se radilo dosta mjerenja, grafički prikazi rezultata podijeljeni su u osam grupa ovisno o debljini, jakosti struje, vremenu pobude ili broju mjerenja.

4.1. Ponovljivost mjerenja

Na uzorku stakla debljine 10 mm praćen je odziv i pobuda na jakost struje od 1 A tijekom 10 s. Mjerenje je ponovljeno još dva puta te su sva tri mjerenja prikazana na istim grafovima kako bi se utvrdila ponovljivost. Dobiveni rezultati su prikazani na **slikama 15. i 16**.:

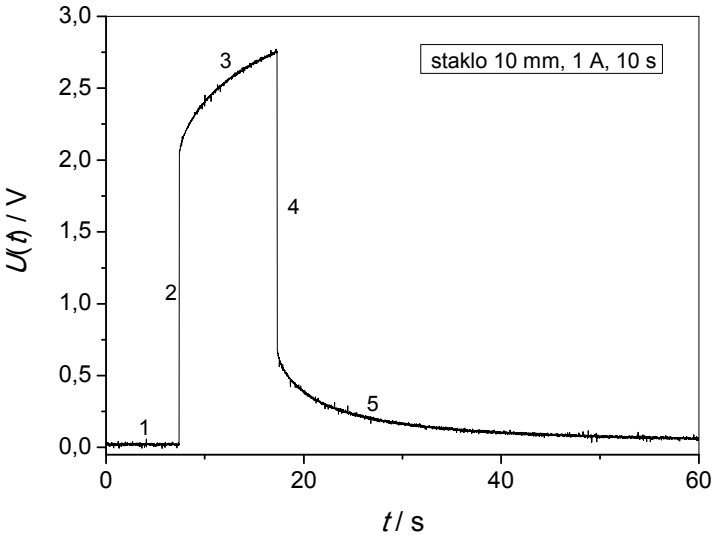


Slika 15. *Prikaz vremenske ovisnosti napona pobude i tranzijent nakon pobude Peltierovog elementa u tri ponovljena eksperimenta (uzorak je staklo debljine 10 mm, jakost struje 1 A tijekom 10 s)*



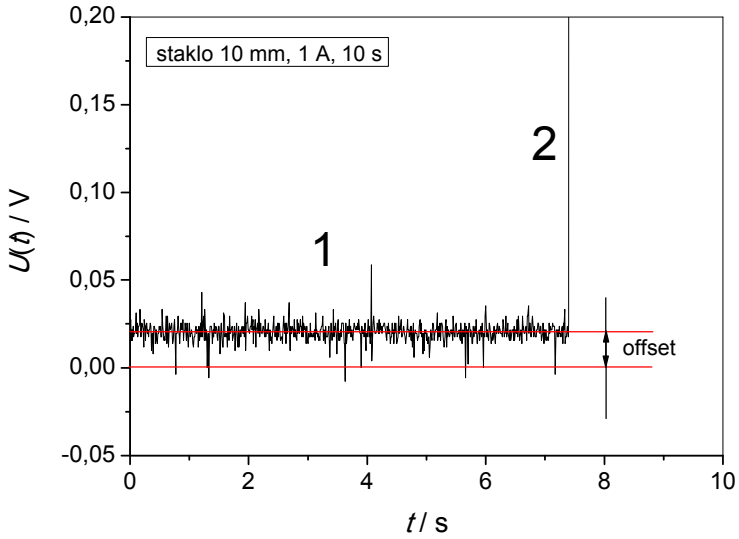
Slika 16. *Prikaz vremenske ovisnosti napona odziva u tri ponovljena eksperimenta (uzorak je staklo debljine 10 mm, jakost struje 1 A tijekom 10 s)*

Prilikom obrade rezultata primjećen je tipičan izgled krivulje pobude za sve materijale. Krivulja se može podijeliti u pet segmenata. Tipična krivulja izgleda kao na **slici 17.**.



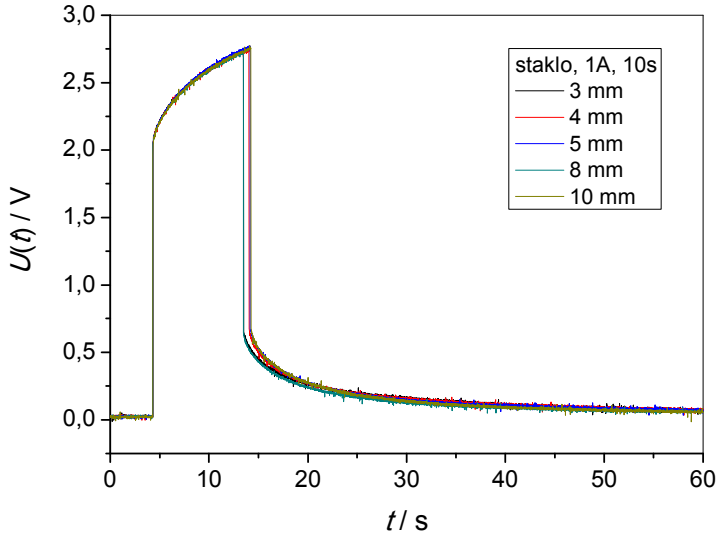
Slika 17. *Prikaz vremenske ovisnosti napona pobude i tranzijent nakon pobude Peltierovog elementa podijeljen u pet segmenata (uzorak je staklo debljine 10 mm, jakost struje 1 A tijekom 10 s)*

Na **slici 18.** prikazan je detalj vremenske ovisnosti napona Peltierovog elementa gdje je vidljiv početni offset napona i trenutak uključenja istosmjersne struje.

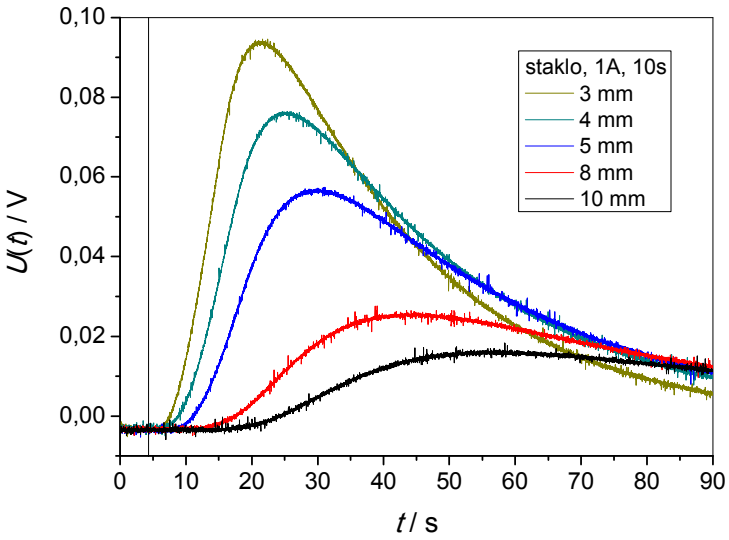


Slika 18. *Prikaz detalja vremenske ovisnosti napona Peltierovog elementa (prvi i dio drugog segmenta za uzorak staklo debljine 10 mm, jakost struje 1 A tijekom 10 s)*

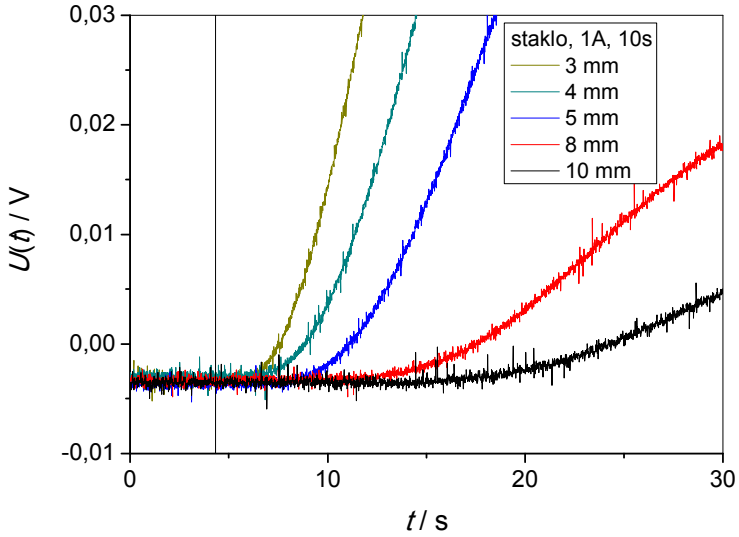
4.2. Utjecaj debljine uzorka



Slika 19. *Prikaz vremenske ovisnosti napona pobude i tranzijent nakon pobude Peltierovog elementa za uzorke stakla debljine 3, 4, 5, 8 i 10 mm, uz jakost struje pobude od 1 A tijekom 10 s*



Slika 20. *Prikaz vremenske ovisnosti napona odziva nakon pobude Peltierovog elementa za uzorke stakla debljine 3, 4, 5, 8 i 10 mm, uz jakost struje pobude od 1 A tijekom 10 s. Okomitom linijom označen je trenutak početka pobude.*

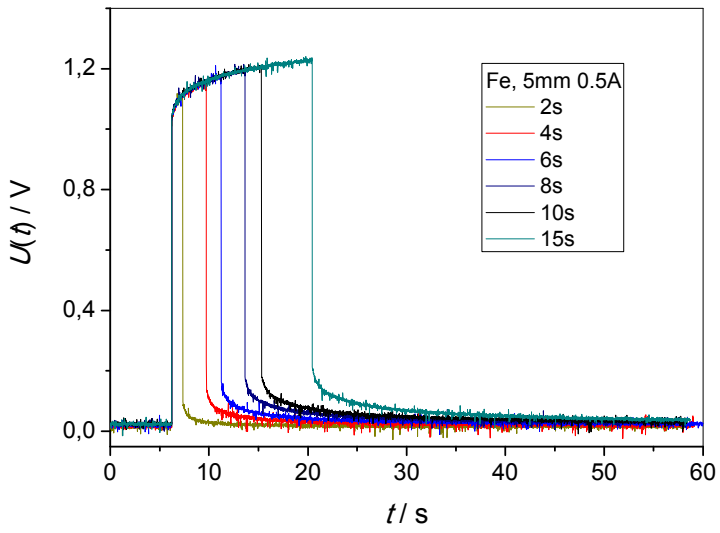


Slika 21. *Detalj vremenske ovisnosti napona odziva nakon pobude Peltierovog elementa za uzorke stakla debljine 3, 4, 5, 8 i 10 mm, uz jakost struje pobude od 1 A tijekom 10 s. Okomitom linijom označen je trenutak početka pobude.*

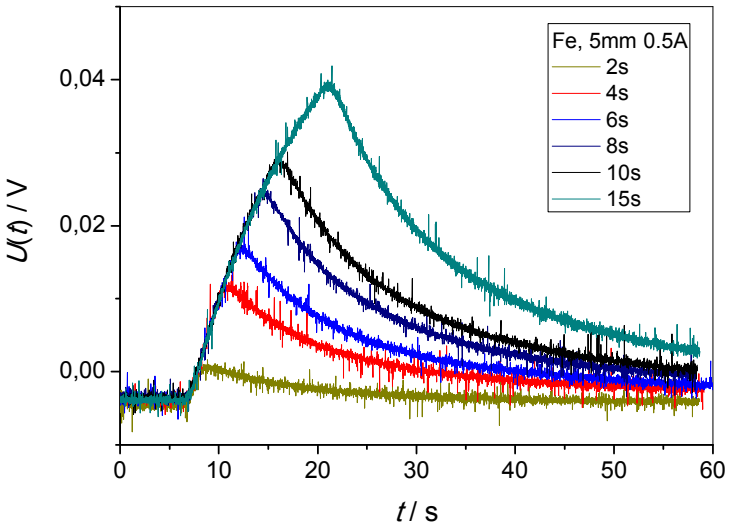
Imali smo pet uzoraka stakla različitih debljina (3, 4, 5, 8 i 10 mm). Na **slikama 19. i 20.** prikazan je utjecaj debljine na napon pobude i odziva za istu jakost struje od 1 A u i vrijeme pobude od 10s.

4.3. Utjecaj vremena pobude strujom

Na uzorku željeza debljine 5 mm provedeno je mjerenje u kojem se pratilo ponašanje odziva i pobude naponom za različito trajanje pobude jakosti struje od 0.5 A. Dobiveni rezultati prikazani su na **slikama 22. i 23.**



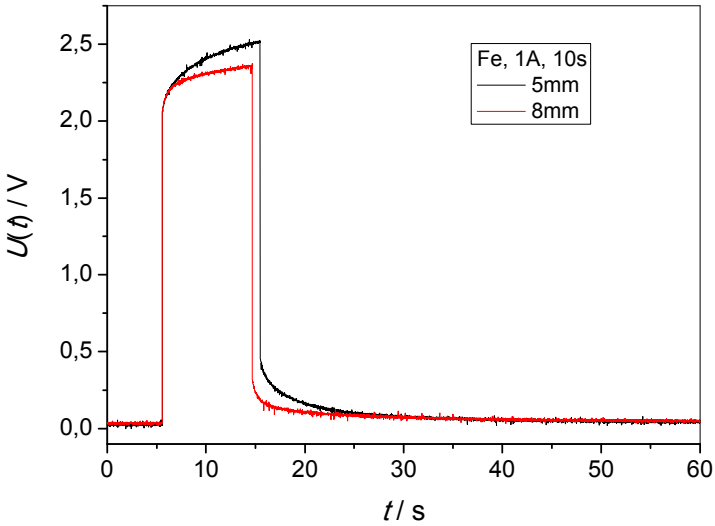
Slika 22. *Prikaz vremenske ovisnosti napona pobude i tranzijent nakon pobude Peltierovog elementa za uzorak metala debljine 5 mm, uz jakost struje pobude od 0.5 A tijekom 2-15 s*



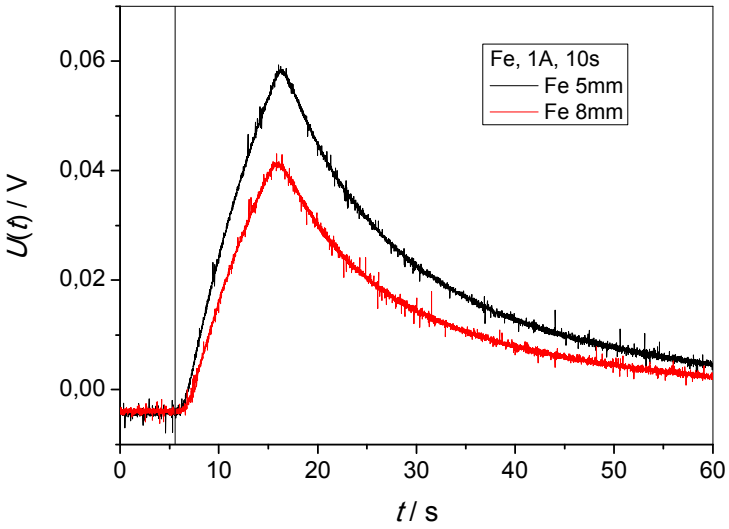
Slika 23. *Prikaz vremenske ovisnosti napona odziva nakon pobude Peltierovog elementa za uzorak metala debljine 5 mm, uz jakost struje pobude od 0.5 A tijekom 2-15 s*

4.4. Utjecaj debljine materijala na kašnjenje odziva

Provedbom mjerenja na uzorku željeza različite debljine pod istim uvjetima primjećeno je da odziv i pobuda materijala vremenski kasni. Kašnjenje je prikazano na **slikama 24.-26.**

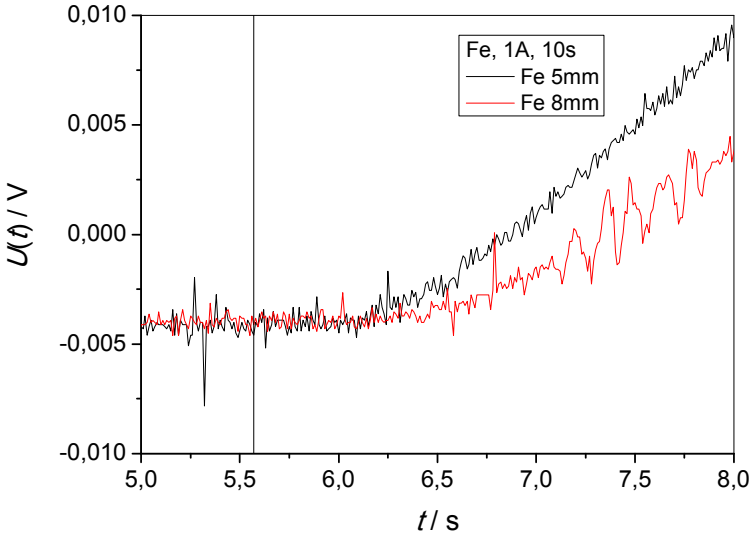


Slika 24. *Prikaz vremenske ovisnosti napona pobude i tranzijent nakon pobude Peltierovog elementa za uzorak metala debljine 5 i 8 mm, uz jakost struje pobude od 0.5 A tijekom 10 s*



Slika 25. *Prikaz vremenske ovisnosti napona odziva nakon pobude Peltierovog elementa za uzorak metala debljine 5 i 8 mm, uz jakost struje pobude od 0.5 A tijekom 10 s. Okomitom crtom označen je trenutak početka pobude.*

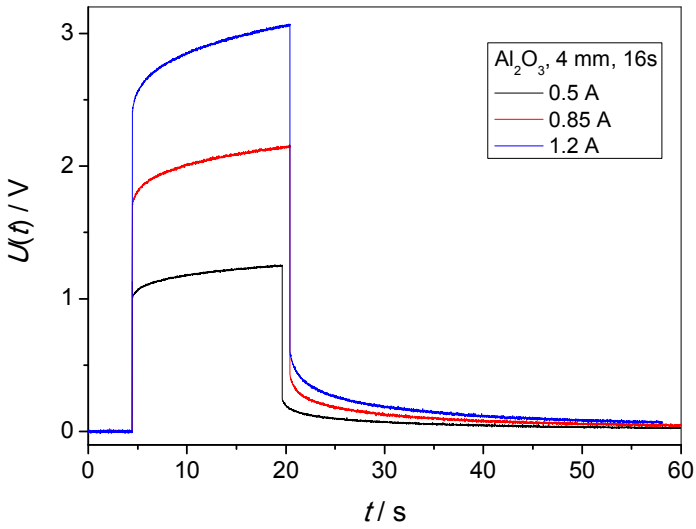
Na **slici 26.** nalazi se detaljniji prikaz na kojem je okomitom crtom označen početak pobude.



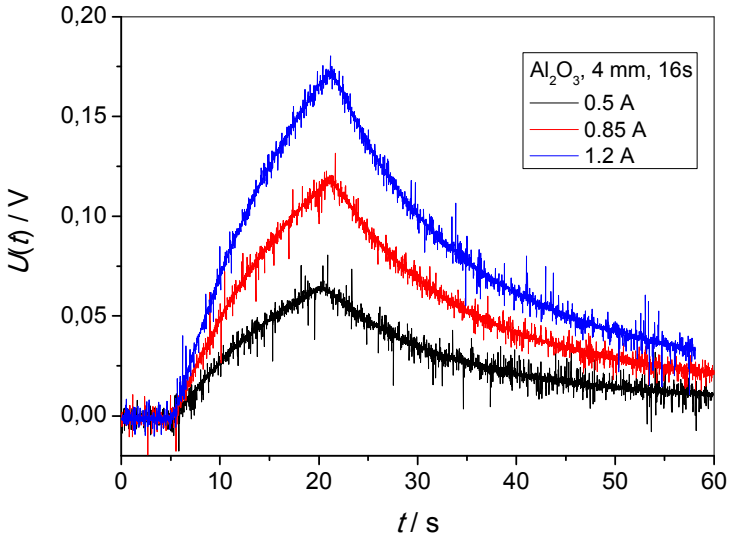
Slika 26. *Prikaz detalja vremenske ovisnosti napona odziva nakon pobude Peltierovog elementa za uzorak metala debljine 5 i 8 mm, uz jakost struje pobude od 0.5 A tijekom 10 s. Okomitom crtom označen je trenutak početka pobude.*

4.5. Utjecaj jakosti struje pobude na odziv

Na uzorku keramike (korund) izvedeno je mjerenje prilikom kojeg se mijenjala jakost struje (0,5, 0,85, 1,2 A) dok je vrijeme pobude bilo konstantno, t = 15 s.



Slika 27. *Prikaz vremenske ovisnosti napona pobude i tranzijent nakon pobude Peltierovog elementa za uzorak keramike od aluminijeva oksida (korunda) debljine 4 mm, uz jakost struje pobude od 0.5 A, 0.85 A i 1.2 A tijekom 16 s*

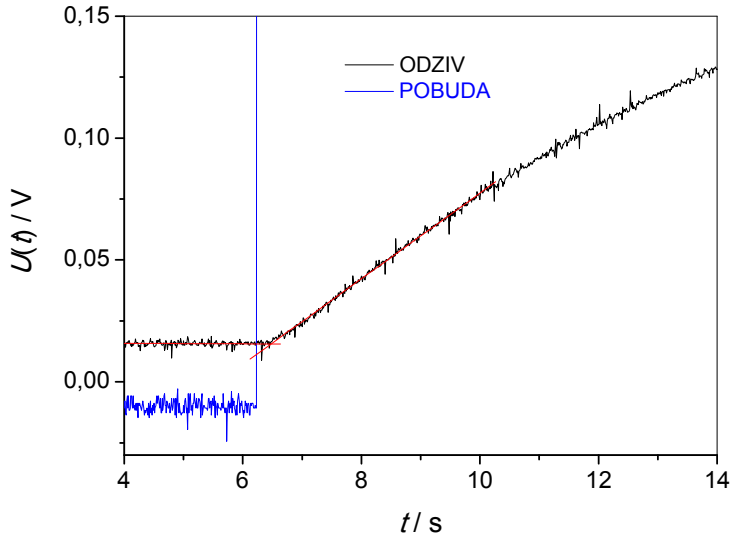


Slika 28. *Prikaz vremenske ovisnosti napona odziva nakon pobude Peltierovog elementa za uzorak keramike od aluminijeva oksida (korunda) debljine 4 mm, uz jakost struje pobude od 0.5 A, 0.85 A i 1.2 A tijekom 16 s*

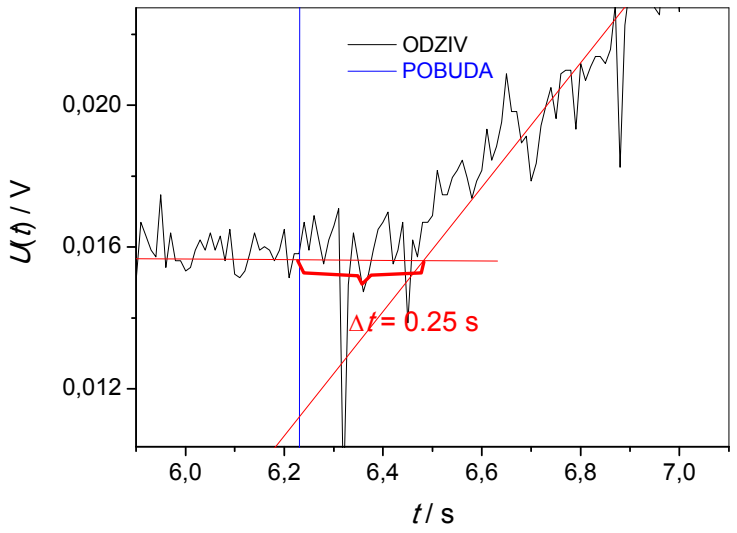
4.6. Pobuda i odziv prilikom direktnog kontakta dva Peltierova elementa

Budući da je i sam Peltierov element građen od različitih materijala, pokušali smo utvrditi koje je vrijeme potrebno da Peltierov element reagira na pobudu. Mjerenje je izvedeno na način da su veliki i mali Peltierov element bili u direktnom kontaktu koji je bio poboljšan pomoću toplinski vodljive paste.

Rezultati su prikazani na **slikama 29. i 30.**



Slika 29. *Prikaz vremenske ovisnosti napona pobude i odziva nakon pobude za dva Peltierova elementa zalijepljena toplinski vodljivom pastom*

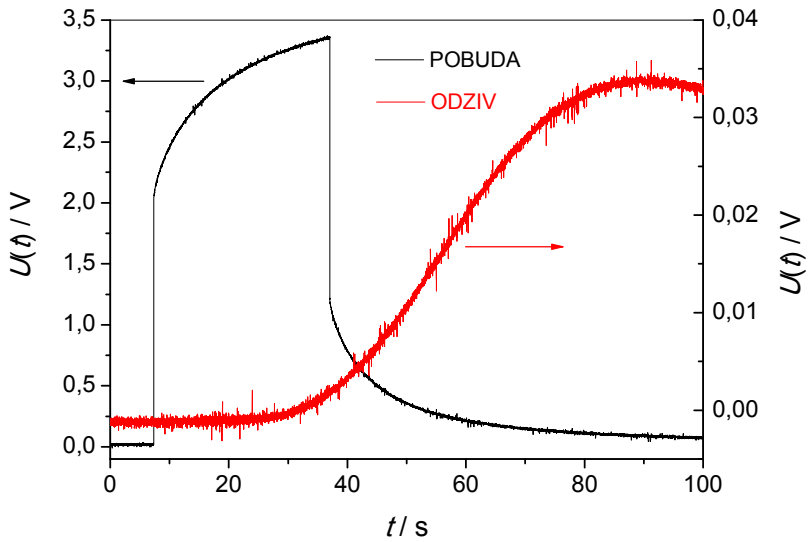


Slika 30. *Detalj vremenske ovisnosti napona pobude i odziva nakon pobude za dva Peltierova elementa zalijepljena toplinski vodljivom pastom*

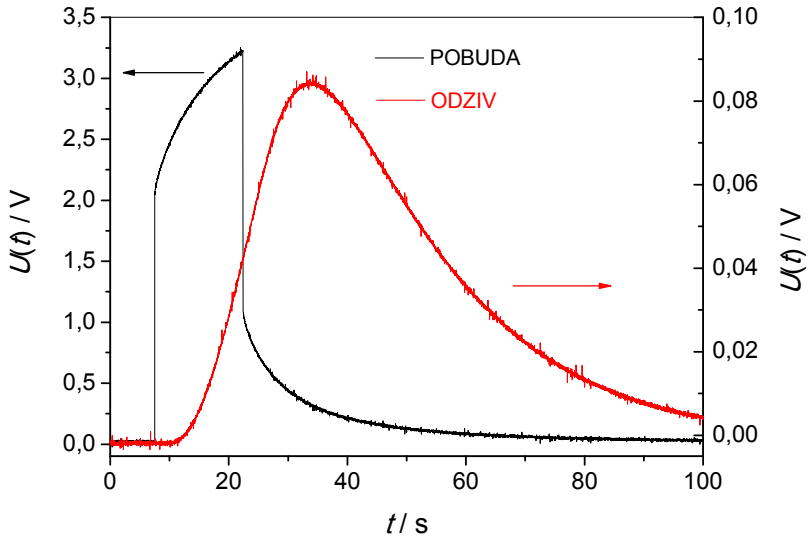
Sjecište dvije crvene linije (linearni dio mjerenog napona odziva prije i neposredno nakon pobude) određuje vremensko kašnjenje koje iznosi $\Delta t = 0.25$ s (**slika 30.**)

4.7. Izgled krivulje odziva i pobude za materijale slabe toplinske vodljivosti

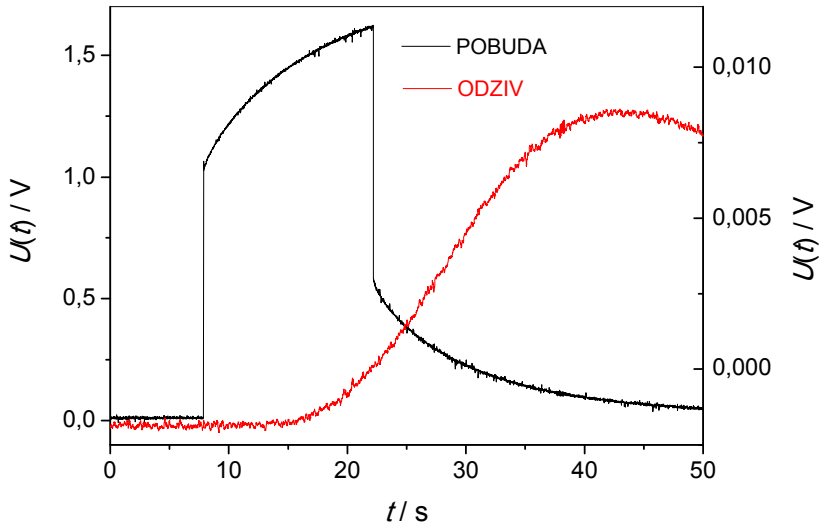
Materijali koji slabije vode toplinu, a bili su naši uzorci su: plastika, pluto i teflon. Na **slikama 31.-35.** nalaze se grafički prikazi krivulja pobude i odziva. Vrijeme reagiranja materijala na pobudu ukazuje na to koji od prikazanih uzoraka ima manju toplinsku vodljivost.



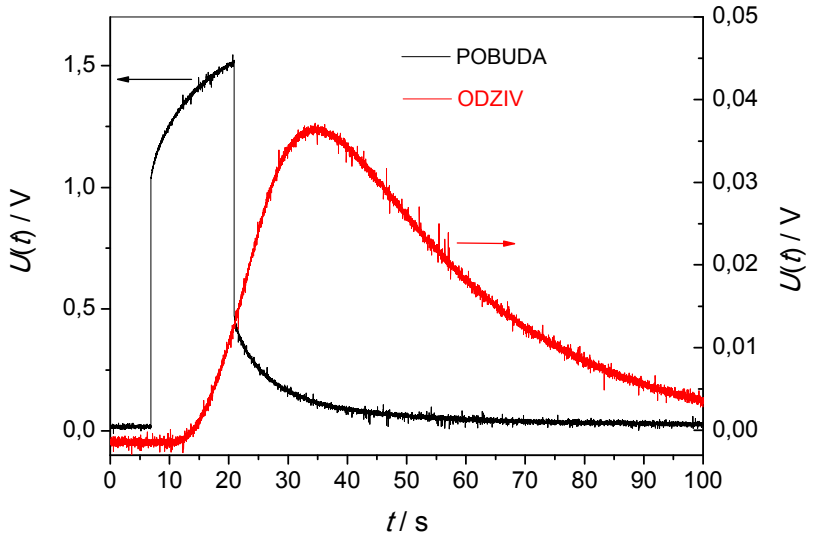
Slika 31. *Prikaz vremenske ovisnosti napona pobude i odziva za uzorak plastike SP debljine 8.2 mm (struja pobude 1 A, u trajanju od 30 s)*



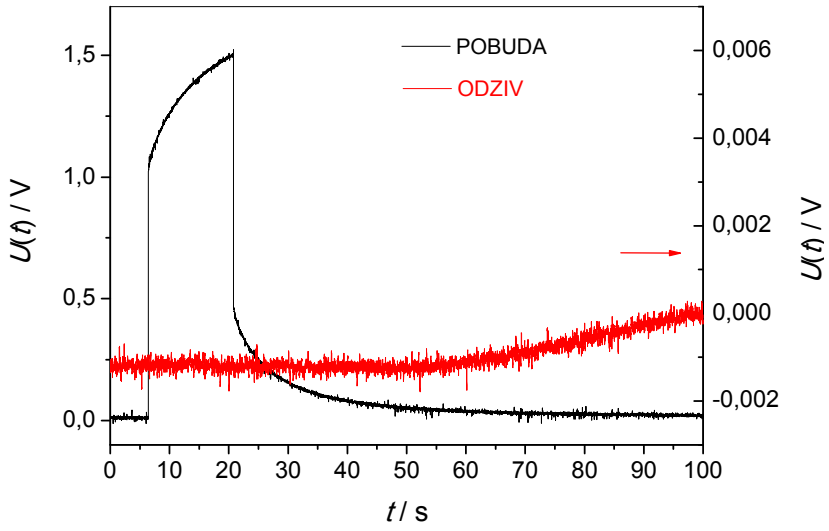
Slika 32. *Prikaz vremenske ovisnosti napona pobude i odziva za uzorak plastike OZ debljine 2.1 mm (struja pobude 1 A, u trajanju od 15 s)*



Slika 33. *Prikaz vremenske ovisnosti napona pobude i odziva za uzorak pluta debljine 3 mm (struja pobude 0.5 A, u trajanju od 15 s)*

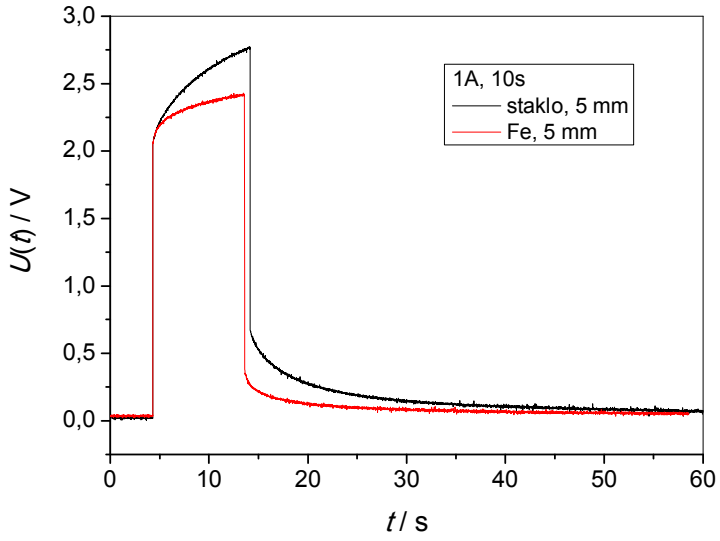


Slika 34. *Prikaz vremenske ovisnosti napona pobude i odziva za uzorak teflona debljine 2.1 mm (struja pobude 0.5 A, u trajanju od 15 s)*

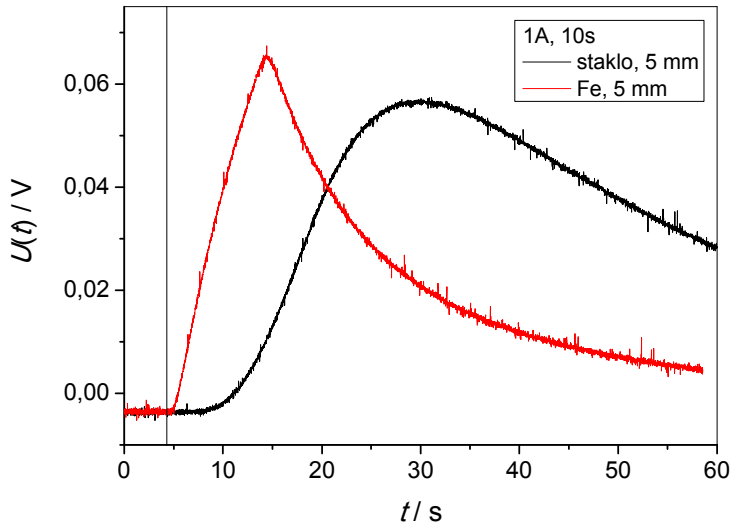


Slika 35. *Prikaz vremenske ovisnosti napona pobude i odziva za uzorak teflona debljine 9.4 mm (struja pobude 0.5 A, u trajanju od 15 s)*

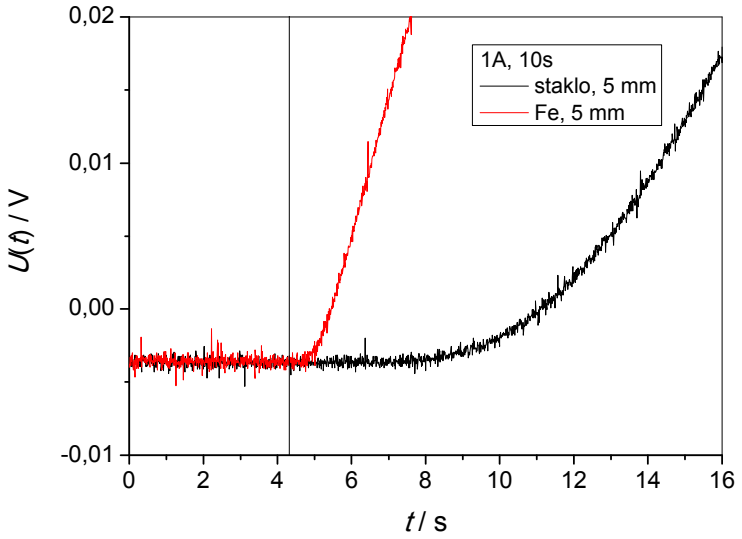
4.8. Usporedba odziva dva različita materijala iste debljine



Slika 36. *Detalj vremenske ovisnosti napona odziva za uzorak metalne i staklene ploče debljine 5 mm (struja pobude 1 A, u trajanju od 10 s)*



Slika 37. *Prikaz vremenske ovisnosti napona odziva za uzorak metalne i staklene ploče debljine 5 mm (struja pobude 1 A, u trajanju od 10 s)*



Slika 38. *Prikaz vremenske ovisnosti napona pobude za uzorak metalne i staklene ploče debljine 5 mm (struja pobude 1 A, u trajanju od 10 s)*

Na **slikama 36.-38.** prikazana je usporedba dva različita materijala iste debljine (staklo i metal). Na slikama se može vidjeti različito ponašanje materijala prilikom mjerenja pri istim uvjetima.

5. RASPRAVA

U inženjerskoj praksi i u znanstveno-istraživačkom radu često se javlja potreba za određivanjem toplinskih svojstava materijala i proizvoda. Mjerenje toplinskih svojstava može se iskoristiti za praćenje procesa proizvodnje i određivanje kvalitete proizvoda ili kao nadopuna ostalih fizikalno-kemijskih ispitivanja. Poželjno je da postupak mjerenja bude brz, da je točan i precizan te da ne oštećuje ispitivani materijal. Dva su osnovna toplinska svojstva materijala, njegova toplinska vodljivost (λ / $Wm^{-1}K^{-1}$) i volumni toplinski kapacitet (c / $Jm^{-3}K^{-1}$). Volumni toplinski kapacitet se često izražava produktom specifičnog toplinskog kapaciteta (c / $Jkg^{-1}K^{-1}$) i gustoće (ρ / kgm^{-3}), a svojstvo toplinske difuzivnosti i efuzivnosti se izvodi iz te dvije poznate veličine, prema **jednadžbama (4) i (5)**. Gustoću materijala potrebno je odrediti u odvojenom eksperimentu. Kraće trajanje eksperimentalnog određivanja toplinskih svojstava poželjno je zbog veće produktivnosti laboratorija i mogućnosti karakterizacije većeg broja uzoraka, te se stoga prednost daje metodama koje koriste relativno kratku pobudu materijala, a iz prijelaznog odziva (tranzijenta) određuju određeno toplinsko svojstvo. Potrebno je napomenuti da određena mjerenja na osnovi matematičke obrade (modela) izmjerenog odziva određuje i toplinsku vodljivost i toplinsku difuzivnost ispitivanog materijala, što uz poznatu gustoću omogućuje i određivanje toplinskog kapaciteta. Za dobivanje reprezentativnih podataka potrebno je ipak uložiti veliko znanje, trud i iskustvo.

U prethodnom istraživanju o mogućnosti mjerenja toplinskih svojstava materijala (Rosković i Žerjav), uporabljen je Peltierov element kao jeftin, jednostavan i robustan senzor razlike temperature između ispitivanog uzorka i toplinskog spremnika (engl. heat sink), te kao pobudni element. Prednost je Peltierovog elementa kao pobudnog elementa mogućnost zagrijavanja i hlađenja uzorka koje se postiže jednostavnom promjenom smjera istosmjerne struje kroz Peltierov element.

U ovom je radu ispitana mogućnost unaprjeđenja osnovne aparature dodatkom još jednog Peltieovog elementa, te se ispitivani uzorak konačne debljine nalazi između dva Peltierova elementa, a dodatni se Peltierov element koristi kao senzor temperature. Osnovna ideja sastoji se u tome da su ispitivani uzorci često konačne debljine, s planparalelnim stranicama, a temperatura druge strane ispitivanog uzorka „kasni“ za pobudom zbog konačne brzine prostiranja topline kroz materijal. U ovom je slučaju najbliža usporedba sa

izvedbom Laser Flash metode gdje karakteristično vrijeme potrebno za određivanje toplinske difuzivnosti raste a kvadratom debljine ispitivanog uzorka.

Osnovni mjerni postav eksperimenta prikazan je na **slici 14.**, a sastoji se od masivnog metalnog valjka kao toplinskog spremnika na kojem je toplinski vodljivom pastom zalijepljen Peltierov element (40x40x4 mm) koji se koristi za pobudu istosmjernom strujom konstantne jakosti. Ispitivani uzorak zalijepi se toplinski vodljivom pastom na Peltierov element, a na gornju stranu uzorka toplinski vodljivom pastom se zalijepi manji Peltierov element (23x23x4 mm) koji služi kao senzor temperature. Na manji Peltierov element toplinski vodljivom pastom zalijepljen je aluminijski hladnjak (**slika 14.**). U eksperimentu, moguće je mijenjati vrstu materijala ispitivanog uzorka, debljinu ispitivanog uzorka, jakost struje pobude i trajanje pobude strujom konstantne jakosti.

U **tablici 2.** navedeni su uvjeti eksperimenta: vrsta materijala ispitivanog uzorka, debljina ispitivanog uzorka, jakost struje pobude i trajanje pobude koji su i prikazani u Rezultatima.

5.1. Ponovljivost mjerenja

Dobra ponovljivost eksperimenta prikazana je na **slikama 15.** (vremenska ovisnost napona pobude i tranzijent nakon pobude) i **16.** (vremenska ovisnost napona odziva). Vrijeme početka pobude nije u trenutku t=0 s, kada je pokrenut osciloskop HS3, nego u nekom kasnijem trenutku kada je ručno pokrenut strujni izvor Siglent SPD3303S.

Vremenska ovisnost napona pobude i tranzijent nakon pobude Peltierovog elementa može se podijeliti u pet segmenata kako je prikazano na **slici 17.**. Prvi segment je vrijeme između pokretanja mjerenja na osciloskopu HS3 i trenutka ručnog uključenja strujnog izvora SPD3303S. Ovo je vrijeme promjenjivo, a služi za određivanje naponskog offseta karakterističnog pri mjerenju osciloskopom (**slika 18.**). Potrebno je napomenuti da je između pojedinih mjerenja potrebno napraviti pauzu od oko dvije do pet minuta kako bi se izjednačile temperature ispitivanog uzorka, Peltierovih elemenata, aluminijskog hladnjaka i toplinskog spremnika. Tijekom tog razdoblja vidljivo je polagano nestajanje tranzijentnog odziva, no ti podaci nisu pohranjeni. Drugi segment odgovara trenutku uključenja istosmjerne struje kada u vrlo kratkom vremenu, reda veličine 0.01 s, napon poraste za iznos $U=I*R_{\mathrm{Peltier}}$. Drugim riječima, Peltierov elemnt i sve priključene žice imaju otpor od oko 2 Ohma, te je potreban napon od oko 2 V kako bi potekla istosmjerna struja jakosti 1 A (**slika**

17.). Treći segment je vrijeme trajanja pobude istosmjernom strujom konstantne jakosti koje se programira u strujnom izvoru SPD3303S. Tijekom pobude dolazi do zagrijavanja jedne i hlađenja druge površine Peltierovog elementa, te se kao posljedica javlja termonapon Peltierovog elementa koji se opire uzroku nastanka zbog čega u trećem segmentu dolazi do monotonog porasta napona.

Potrebno je napomenuti da je napon u nekom trenutku ovog segmenta jednak sumi pada napona na Peltierovom elementu kao Ohmskom otporu i naponu termoelektričnog sloga zbog postignute razlike temperature tople i hladne strane Peltierovog elementa. Zato po isključenju struje u četvrtom segmentu krivulje napon trenutno pada za iznos Ohmske komponente, a odmah slijedi peti segment tijekom kojeg se polagano izjednačavaju temperature u cijelom sustavu, što je vidljivo iz tranzijentnog odziva.

5.2. Utjecaj debljine uzorka

U daljnjem eksperimentu ispitan je utjecaj debljine uzorka na rezultat mjerenja – vremensku ovisnost napona oba Peltierova elementa prikazanu na **slikama 19. i 20.**. Na **slici 19.** naponske krivulje su translatirane tako da se poklopi trenutak početka pobude, kako bi se olakšala analiza rezultata. Vidljivo je da se svih pet naponskih krivulja praktično poklapa, a razlikuju se samo po trajanju pobude. Tijekom rada ustanovljeno je da trajanje programiranog segmenta pobude konstantnom strujom na uređaju SPD3303S ne traje točno zadano vrijeme nego se razlikuje do oko pola sekunde od zadanog vremena, a što nije moguće ispraviti.

Na **slici 20.** prikazana je vremenska ovisnost odziva nakon pobude Peltierovog elementa za uzorke stakla debljine 3, 4, 5, 8 i 10 mm, uz jakost struje pobude od 1 A tijekom 10 s. Jasno je vidljiv utjecaj debljine ispitivanog materijala na odziv, te s porastom debljine materijala dolazi do sve većeg „kašnjenja“ odziva zbog konačne brzine prostiranja topline. Ovo je jasnije vidljivo na **slici 21.**. Važno je primijetiti da maksimalno postignut napon odziva nastupa nakon završetka pobude, to kasnije i to manjeg intenziteta što je veća debljina ispitanog uzorka stakla (**slika 21.**).

5.3. Utjecaj vremena pobude strujom

Utjecaj različitog trajanja pobude na vremensku ovisnost napona Peltierovog elementa ispitan je na uzorku metala debljine 5 mm, a rezultati (translatirani u vremenu) prikazani su na **slikama 22. i 23**.. Na obje slike vidljivo je dobro slaganje rezultata mjerenja koje je

najlakše opisati kao da pripadaju istoj familiji krivulja. Može se primijetiti da je u ovom slučaju odziv (napon na manjem Peltierovom elementu) drugačiji nego pri ispitivanju stakla kada je krivulja odziva zvonolika dok sada izgleda kao da se sastoji od dva segmenta. Maksimum napona odziva postiže se neposredno nakon prestanka pobude.

5.4. Utjecaj debljine materijala na kašnjenje odziva

Ispitan je utjecaj debljine metala na kašnjenje odziva, a rezultati su prikazani na **slikama 24., 25. i 26.**. Interesantno je primijetiti da uz istu pobudu, deblja metalna ploča uzrokuje manji porast temperature između tople i hladne strane Peltierovog elementa (**slika 24.**), tj. ponaša se kao bolji toplinski spremnik od tanje metalne ploče. Maksimum odziva napona Peltierovog elementa za uzorak deblje metalne ploče je također manji nego za uzorak tanje metalne ploče. Vremensko kašnjenje odziva je vrlo malo u usporedbi sa ispitanim uzorcima stakla iste debljine.

5.5. Utjecaj jakosti struje

U daljnjim je eksperimentima ispitan utjecaj jakosti struje pobude na odziv, pri čemu je kao uzorak ispitana keramička ploča debljine 4 mm od aluminijeva-oksida tj. korunda. Rezultati su prikazani na **slikama 27. i 28.**. Vidljivo je da napon raste s porastom struje pobude, no i odziv također gotovo linearno raste s porastom struje pobude. Interesantno je primijetiti da odziv korundne keramike (dobre toplinske vodljivosti) kvalitativno izgleda kao odziv metalne ploče.

5.6. Pobuda i odziv prilikom direktnog kontakta dva Peltierova elementa

Uočeno je da materijali dobre toplinske vodljivosti (stoga i velike toplinske difuzivnosti) daju vrlo kratko kašnjenje napona odziva, te je stoga određeno kašnjenje odziva samih Peltierovih elemenata. Za ovo je mjerenje mali Peltierov element direktno zalijepljen na veliki Peltierov element, te su rezultati mjerenja prikazani na **slikama 29. i 30.**. U slučaju da se u daljnjim istraživanjima odredi postupak obrade rezultata mjerenja za određivanje vremena kašnjenja odziva (u ovisnosti o debljini materijala uzorka), tada je od tako određenog vremena potrebno oduzeti $\Delta t = 0.25$ s (**slika 30.**).

5.7. Izgled krivulje pobude i odziva za materijale slabe toplinske vodljivosti

U daljnjim ispitivanjima toplinski slabo vodljivih materijala (plastike i pluta), pokazalo se da je odziv zvonolikog oblika, no jednako tako i da postoji fizička granica debljine ispitivanog uzorka ako se želi izvesti pouzdano mjerenje, bez utjecaja rubnih efekata (**slike 31.-35.**).

5.8. Usporedba odziva dva različita materijala iste debljine

Uz jednaku pobudu, na sljedećim su slikama uspoređeni odzivi metala i stakla iste debljine. Na **slici 38.** vidljivo je da staklo slabije odvodi toplinu od metalne ploče, te je porast razlike temperatura između tople i hladne površine Peltierovog elementa veći u slučaju staklene ploče (zato jer je veći monotoni porast napona u trećem segmentu krivulje). Na **slici 37.** prikazan je odziv metalne i staklene ploče, pri čemu je odziv staklene ploče zvonolik, a odziv metalne ploče kao da se sastoji od dva segmenta. Detalj naponskog odziva prikazan je na **slici 36.** Kvalitativna sličnost ovog mjernog postava i Laser Flash metode navodi na pretpostavku da je ovim eksperimentom moguće odrediti toplinsku difuzivnost materijala (**slika 36** i **slika 3.**).

6. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada bio je osmisliti aparaturu pomoću koje će se na pristupačan i lak način moći odrediti toplinska svojstva materijala.

Opis i komentar rezultata mjerenja u ovom radu je kvalitativan, jer za kvantitativni opis nedostaje matematički model (i numeričko rješenje matematičkog modela) prijenosa topline za ovu geometriju.

Pomoću kvalitativnih rezultata na jednostavan način možemo usporediti dva materijala te ustanoviti koji od njih bolje provodi toplinu. Budući da su metode mjerenja topline ponekad komplicirane i ograničene na razne parametre, ovim načinom mjerenja omogućeno je brzo ustanoviti razliku u toplinskoj vodljivosti pojedinih materijala. Nedostatak metode je u tome što će se teže razlikovati materijali slične toplinske vodljivosti te je stoga moguće preporučiti da se daljnji rad usmjeri na razvoj odgovarajućeg matematičkog modela koji bi se kvantitativno usporedio s rezultatima eksperimenta. Ispitivanje certificiranog referentnog materijala poznatih toplinskih svojstava također može dati vrijedne podatke u razvoju modela prijenosa topline.

7. LITERATURA

[1] Bošnjaković, F.: „*Nauka o toplini, I. dio*", V. popravljeno izdanje, Tehnička knjiga, Udžbenici Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 1978.

[2] http://www.pmf.unsa.ba dostupno 17.7. 2015.

[3] Stanković, I.: „*Određivanje toplinske provodljivosti materijala metodom vrućeg diska*", Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu Zagreb, 2014.

[4] Kulišić, P.: „*Mehanika i toplina*", Školska knjiga, Zagreb, 2005.

[5] http://www.phy.uniri.hr/ dostupno 17.7.2015.

[6] https://en.wikipedia.org/wiki/Thermal_diffusivity dostupno 17.7. 2015.

[7] Jaković, M., Slaviček I.: „*Analiza toplinskih svojstava građevnih materijala primjenom metode vrućeg diska*", Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu Zagreb, 2010.

[8] Glasnović, A., Sander A.: „*Prijenos tvari i energije*", Interna skripta, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Sveučilište u Zagrebu Zagreb, 2010.

[9] http://www.geography.hunter.cuny.edu 18.7.2015.

[10] http://physics.stackexchange.com/ 18.7.2015.

[11] http://thermophysical.tainstruments.com/ (Principal methods of thermal conductivity measurements) 2.7.2015.

[12] Maarten F. van Gelder: „*A Thermistor Based Method for Measurement of Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity of Moist Food Materials at High Temperatures*", Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, USA, 1998.

[13] W. J. Parker, R. J. Jenkins, C. P. Butler and G. L. Abbott: *Flash Method of Determining Thermal Diffusivity, Heat Capacity, and Thermal Conductivity*, J. Appl. Phys. 32, 1679 (1961)

[14] https://www.netzsch-thermal-analysis.com dostupno 20.7.2015.

[15] http://www.azom.com/ dostupno 20.7.2015.

[16] Šumiga I.1 , Grđan M.1 , Huđek J.: „*Termoelektrični moduli – fizikalne osnove i smjernice za uporabu* ", Veleučilište u Varaždinu, Varaždin, 2007.

[17] http://www.phy.pmf.unizg.hr/~kivan/Peltierovefekt.htm dostupno 20.7.2015.

[18] http://www.centralds.net/en/image/PELTIER.jpg dostupno 20.7.2015.

[19] Rosković M, Žerjav J.: „*Izrada i umjeravanje uređaja za mjerenje toplinskih svojstava krutina*", Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2015

8. POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA KORIŠTENIH U RADU

Oznaka	Jedinica	Fizikalna veličina
A	**[m^2]**	**površina**
L	**[m]**	**debljina uzorka**
m	**[kg]**	**masa**
t	**[s]**	**vrijeme**
T	**[K]**	**temperatura**
ΔT	**[K]**	**promjena temperatura**
ρ	**[kgm^{-3}]**	**gustoća**
Q	**[J]**	**količina topline**
Φ	**[Wm^{-2}]**	**toplinski tok**
C	**[JK^{-1}]**	**toplinski kapacitet**
c	**[JK^{-1}kg^{-1}]**	**specifični topl. kapacitet**
λ	**[Wm^{-1}K^{-1}]**	**toplinska vodljivost**
a	**[m^{2}s^{-1}]**	**toplinska difuzivnost**
e	**[Ws$^{1/2}$m^{-2}K^{-1}]**	**toplinska efuzivnost**
ΔU	**[V]**	**razlika napona**
α	**[VK^{-1}]**	**Seebackov koeficijent**
I	**[A]**	**Jakost struje**

9. ŽIVOTOPIS

Šejla Zukić, rođena 22. ožujka 1994. godine. Nakon završene Osnovne škole Ivana Mažuranića u Zagrebu pohađa 2. gimnaziju, smjer opća gimnazija, gdje je maturirala 2012. godine. Iste godine upisuje Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, smjer Kemija i inženjerstvo materijala. Nakon druge godine studija odrađuje praksu u trajanju od mjesec dana u Zagrebačkoj pivovari.