

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI DIPLOMSKI STUDIJ

Ivan Juriško

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, lipanj 2010.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI DIPLOMSKI STUDIJ

Ivan Juriško

EKOLOŠKI TERMOIZOLACIJSKI MATERIJALI

DIPLOMSKI RAD

Voditelj rada: Dr. sc. Juraj Šipušić, docent

Članovi ispitnog povjerenstva:

Dr. sc. Juraj Šipušić, izv. prof

Dr. sc. Zvonimir Glasnović, docent

Dr. sc. Neven Ukrainczyk, viši asistent

Zagreb, lipanj 2010.

Zahvaljujem svom mentoru doc. dr. sc. Jurju Šipušiću na strpljenju, pomoći i vodstvu pri izradi ovog diplomskog rada.

Srdačno zahvaljujem dr. sc. Nevenu Ukrainczyku na uloženom trudu i vremenu te posebno na korisnim savjetima koji su olakšali izradu ovog rada.

SAŽETAK

U ovom su radu ukratko opisani razlozi zbog kojih slama postaje sve popularniji građevni materijal, njeni resursi te metode građenja slamom. Opisani su osnovni pojmovi vezani uz toplinska svojstva materijala te metode koje se koriste u svrhu njihovog određivanja. Predložena je eksperimentalna metoda za mjerenje toplinske vodljivosti i toplinske difuzivnosti građevnih materijala.

Za mjerenje toplinske vodljivosti balirane slame odabrana je Gustaffsonova metoda vruće ploče dok je za mjerenje toplinske difuzivnosti odabrana metoda izlaganja uzorka skokovitim promjenama temperature. Gustaffsonova metoda vruće ploče za dinamička određivanja toplinskih svojstava materijala je umjerena i vrednovana primjenom ekspandiranog polistirena kao referentni materijal. Detaljno je opisana obrada eksperimentalnih podataka, a sami rezultati su uspoređeni s rezultatima koji su navedeni u znanstvenoj literaturi.

Ključne riječi: prirodni materijali, slama, toplinska vodljivost, toplinska difuzivnost, Gustaffsonova metoda vruće ploče

ABSTRACT

This work describes the reasons of the increased interest in strawbale building as well as the methods that are used in that process. A short description of the thermophysical properties and measurement methods is given. The experimental method for measuring thermal conductivity and thermal diffusivity of building materials is proposed and calibrated using expanded polystyrene as a standard material.

Gustaffson's guarded hot plate technique is chosen for measuring the thermal conductivity while the transient method is chosen for measuring the thermal diffusivity. Experimental data processing and acquired results are discussed. The comparison of the results obtained in this work with the data found in literature has been given.

Keywords: natural materials, strawbale building, thermal conductivity, thermal diffusivity, Gustaffson's hot plate technique

SADRŽAJ:

1. UVOD	1
2. OPĆI DIO	3
2.1. Resursi slame.....	3
2.2. Metode građenja korištenjem slame.....	5
2.3. Toplinska svojstva materijala.....	8
2.3.1. Definicije	8
2.3.2. Toplinska svojstva slame	10
2.4. Procesi prijenosa topline	13
2.4.1. Kondukcija	13
2.4.2. Konvekcija	13
2.4.3. Radijacija.....	14
2.5. Metode određivanja toplinske vodljivosti	15
2.5.1. Metode u ustaljenom stanju.....	15
2.5.1.1. Metoda zaštićene vruće ploče	15
2.5.2. Dinamičke metode.....	16
2.5.2.1. Metoda vruće žice	17
2.5.2.2. Metoda vruće ploče	18
2.5.2.3. Gustaffsonova metoda vruće ploče	18
2.5.2.4. Model Gustaffsonove metode vruće ploče.....	21
2.5.2.5. Mjerenje temperaturnog odziva vruće ploče	23
2.5.2.6. Određivanje toplinske difuzivnosti izlaganjem materijala skokovitoj promjeni temperature	25
3. EKSPERIMENTALNI DIO.....	29
3.1. Uzorci	29
3.2. Određivanje toplinske vodljivosti Gustaffsonovom metodom vruće ploče	30
3.3. Mjerenje toplinske difuzivnosti izlaganjem materijala nagloj promjeni temperature...	32
4. REZULTATI.....	34
4.1. Određivanje toplinske vodljivosti Gustaffsonovom metodom vruće ploče	34
4.1.1. Mjerenja na referentnom materijalu	34
4.1.2. Mjerenja na balama slame.....	38
4.2. Određivanje toplinske difuzivnosti izlaganjem materijala skokovitoj promjeni temperature	41

5. RASPRAVA.....	47
5.1. Određivanje toplinske vodljivosti Gustaffsonovom metodom vruće ploče	47
5.2. Određivanje toplinske difuzivnosti izlaganjem materijala skokovitoj promjeni temperature	50
6. ZAKLJUČAK	52
7. POPIS OZNAKA	53
8. LITERATURA.....	54
9. PRILOG	56
ŽIVOTOPIS	57

1. UVOD

Zbog sve većeg interesa za ekologiju i uštedu energije u gradnji objekata, slama svakodnevno postaje sve zanimljiviji materijal u građevinskoj struci. Glavne prednosti slame kao građevnog materijala su obnovljivost, odlična toplinska i zvučna izolacijska svojstva, mehanička stabilnost, niska cijena, jednostavnost građenja i nizak rizik od požara. Slama se još uvijek prvenstveno promatra kao poljoprivredni otpadni produkt te je stoga potražnja za slamom puno manja od proizvodnje. Cijena jedne bale slame se u Hrvatskoj ugrubo kreće između 3 i 10 kuna što je i u najskupljoj opciji puno jeftinije nego građenje zidova od cigle ili blokova.^{1,2}

Slama predstavlja izrazito zdravu alternativu modernim građevinskim materijalima zbog toga što je prirodan materijal i nema štetnih utjecaja niti može uzrokovati alergije. Kvaliteta zraka u kućama od slame bitno je bolja jer ne može doći do isparavanja opasnih kemikalija kao što je to moguće korištenjem sintetskih materijala.



Slika 1. a) i b) Prikaz gradnje baliranom slamom

Dimenzije balirane slame omogućuju vrlo jednostavnu i brzu gradnju bez dodatnih vezivnih sredstava. Zidovi od balirane slame su više nego adekvatni za nošenje tipičnih tereta kao što su etaže, krovšta i teški nanosi snijega na krovu. Laboratorijska i empirijska istraživanja su pokazala da se balirana slama može koristiti i kao materijal za izgradnju nosivih zidova, a ne samo kao izolacija. Zidovi napravljeni od slame su pogodni za žbukanje čime se slama na jednostavan način zaštićuje od vanjskih utjecaja i nametnika.

Osim balirane slame, u graditeljstvu se još koriste građevni elementi napravljeni od dodatno usitnjene i komprimirane slame bez dodataka kemijskih veziva. Takvi građevni elementi mogu biti napravljeni u obliku blokova, ploča ili različitih vrsta profila. Pri povišenom tlaku i temperaturi, uz dodatak ekoloških veziva, dolazi do jakog povezivanja komadića slame čime se postižu izuzetna mehanička svojstva materijala.



Slika 2. a) i b) Različite izvedbe građevnih elemenata od komprimirane slame

Zbog gusto nabijene slame u blokovima, pločama ili balama, onemogućen je pristup većoj količini kisika u središte materijala. Zbog toga je slama iznenađujuće otporna na vatru. Zidovi napravljeni od slame su otporniji na vatru od klasičnih drvenih kuća, a opasnost od požara se još dodatno može smanjiti nanošenjem žbuke na slamnate zidove.

Metode određivanja toplinskih svojstava i provedba mjerenja će biti detaljno prikazani u eksperimentalnom dijelu i rezultatima ovog rada.

2. OPĆI DIO

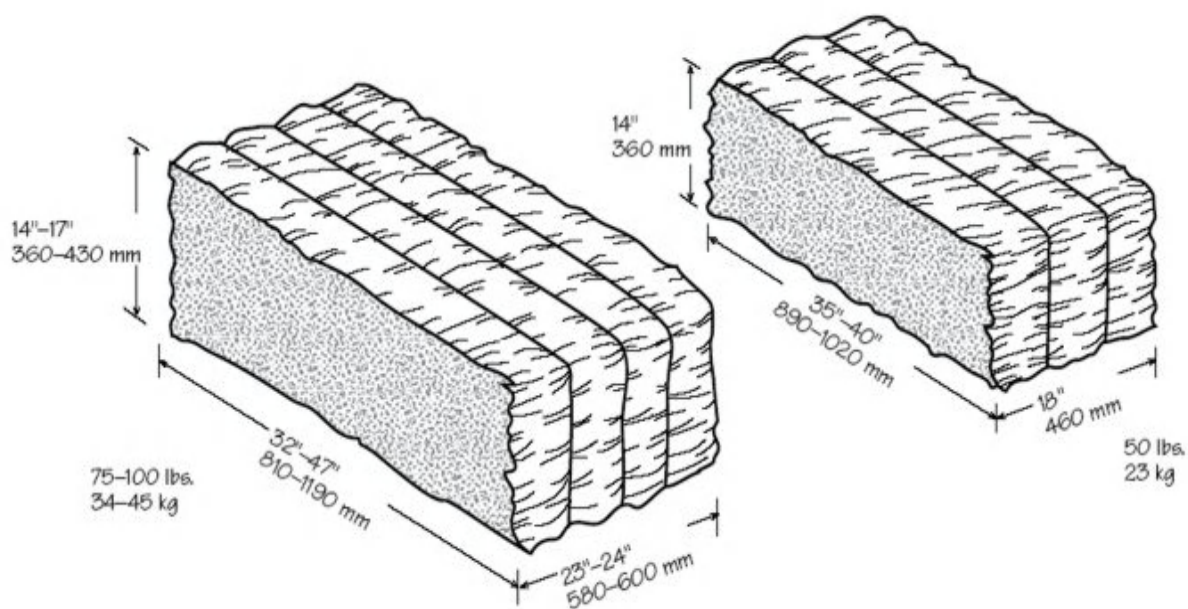
2.1. Resursi slame

Zbog sve većeg zanimanja javnosti za slamom kao ekološkim građevnim materijalom, napravljena su mnogobrojna istraživanja o količini slame koja bi se mogla iskoristiti u tu svrhu. Slama je nejestiva stabljika raznih žitarica kao što su pšenica, riža, raž, ječam i zob. Samo u Sjevernoj Americi se godišnje proizvede oko 140 milijuna tona slame, a u Velikoj Britaniji oko 10 milijuna tona. Trećina od ukupno proizvedene slame je iskoristiva za gradnju kuća. Druga trećina proizvedene slame se podorava nazad u zemlju jer se time zemlja aerira i dodatno obogaćuje hranjivim organskim tvarima, a preostali dio se koristi u stočarstvu. U prošlosti se višak slame ukopavao u zemlju čime bi se poremetila prirodna ravnoteža zemlje ili se čak spaljivao oslobađajući tako velike količine CO₂. Spaljivanje viška slame je danas zakonom zabranjeno u većini modernih zemalja zbog sprječavanja onečišćenja zraka i smanjenja rizika od požara.

Hrvatska također ima velike resurse slame koja se može koristiti u gradnji. U Hrvatskoj je 2009. godine, prema podacima Državnog zavoda za statistiku, proizvodnja pšenice porasla za tri posto, a proizvodnja zobi porasla je za dva posto u odnosu na 2008. godinu. Prošle je godine proizvedeno 888.750 tona pšenice na površini od 197.500 hektara. Proizvodnja zobi porasla je na 66.650 tona ukupnog priroda sa zasijanih 21.500 hektara. Ako se uzme da je omjer prinosa zrna i slame podjednak ², Hrvatska je prošle godine proizvela oko 477.700 tona slame samo od uzgoja pšenice i zobi. Kada se tome pribroji uzgoj ječma i raži, dolazi se do brojke od skoro milijun tona slame.

Iz ovih podataka možemo ugrubo reći da se u Hrvatskoj godišnje proizvede oko 300 000 tona slame koja se može iskoristiti kao građevinski materijal.

Slama se nakon žetve balira u strojevima za baliranje i to najčešće u velike cilindrične bale ili u manje, četvrtaste bale. Strojevi za baliranje komprimiraju slamu i zatim ju omataju špagom, mrežom ili žicom. Četvrtaste bale se standardno omataju 2 ili 3 puta nakon čega se skladište.



Slika 3. Standardne dimezije trožično i dvožično povezane bale ³

Ovako dobivene bale slame se nakon sušenja mogu koristiti kao građevni materijal, a mogu se i dodatno stlačiti kako bi im se poboljšala mehanička svojstva.

2.2. Metode građenja korištenjem slame

Kuće od slame mogu biti napravljene tako da potpuno izgledaju kao objekti građeni konvencionalnim materijalima. Slama se može koristiti kao termoizolacijska ispuna, kao nosivi zid i termoizolacijski materijal ili kao posebni, dodatno sprešani blokovi, ploče i profili posebne namjene. U slučaju kada se slama koristi kao ispuna, nosivi strukturni elementi objekta napravljeni su najčešće od drveta, armiranog betona, ali u nekim slučajevima čak i od metala.¹ Ova metoda pruža brojne mogućnosti gradnje te se njome mogu graditi i višetažni objekti. Nakon što se napravi nosivi dio objekta, slamom se ispune praznine pa se nakon toga pristupa žbukanju.



Slika 4. Slama kao termoizolacijska ispuna

U tu svrhu se najčešće koristi žbuka na bazi vapna, a gdje je to moguće, glinene žbuke predstavljaju jeftinu i ekološku alternativu. Cementna žbuka je neprikladna za korištenje u kombinaciji sa slamom, jer onemogućava prolaz viška vodene pare iz unutrašnjosti objekta prema van. Kondenzacija vlage u zidovima može uzrokovati truljenje slame i time nepovratno uništiti zidove. Vлага ne predstavlja problem ukoliko se koristi žbuka koja omogućava prolaz vlage.

U slučaju kada se slama koristi kao nosivi zid i termoizolacijski materijal, bale slame se mogu slagati u stupce ili na isti način kao i cigle, ali se ne dodaje nikakvo vezivo. U nekim se pokušajima gradnje između bala dodavao cement kao vezivno sredstvo, ali su na taj način stvoreni toplinski mostovi, a nisu se poboljšala mehanička svojstva. Glavni problemi u gradnji slamom predstavlja kiša koja se odbija od zemlje na bazu zidova te kiša nošena vjetrom. Zbog toga temelji moraju biti napravljeni tako da se bale slame odvoje od zemlje kako bi se spriječio ulaz vlage te se krov mora napraviti tako da pokriva veći prostor oko zidova. Obično se prvi sloj bala podiže za najmanje 22,5 cm od tla i ostavlja se 45 cm nadstrešnice za zaštitu zidova od kiše.³ Prvi sloj bala mora biti namješten polako i pažljivo jer predstavlja obrazac po kojem će se razviti zidovi. Poželjno je postaviti i vodonepropusnu zaštitu između temelja i zidova od slame. Tijekom skladištenja i čuvanja na gradilištu, važno je spriječiti vlaženje središta bala jer se neće moći dovoljno osušiti kako bi se mogle koristiti u gradnji. Vlaženje vanjskih stranica bala obično ne predstavlja problem.

Konstruktivski okviri za vrata čvrsto se pričvršćuju za temelje ili bazne grede prije polaganja slame. Prozorski okviri ugrađuju se u zidove kako se oni podižu te se pribijaju klinovima kroz prozorsku bazu ili stranice. Područje oko prozora i vrata je najosjetljivije na prodor vode pa se ta mjesta moraju posebno izolirati vodonepropusnim materijalima. Smjesa slame i gline se može koristiti za ispunu šupljina koje ostanu između izolacije i zidova od slame. Takva smjesa se često koristi u ovom tipu gradnje zato što je napravljena od ekoloških materijala, dobra je izolacija i odbija nametnike. Za veće građevine četverokutnih i pravokutnih oblika s nosećim zidovima, korisno je uporabiti privremene kutne grede kako bi se osigurala vodilja po kojoj će kutovi biti okomiti.

Uzdruž napravljenih zidova se stavljaju drvene grede te se one međusobno povezuju kako bi se dobio okvir na koji će se postaviti poprečne grede i krovšte. Zidovi i okvir se zatim povezuju trakama ili žicama kako bi se osigurala nepomičnost i ravnoca zidova. Zidovi se mogu učvrstiti i zabijanjem kolaca kroz središte naslaganih bala, ali povezivanje trakama ili žicom daje bolje rezultate i jednostavnije je za primjenu. Na okvir se zatim najčešće postavljaju grede koje će nositi krovšte ili drugu etažu.



Slika 5. Slama kao nosivi zid i termoizolacijski materijal

Krovište može biti napravljeno od drvenih profila u koje se umeće slama. Takvi se profili zatim izoliraju vodonepropusnim materijalima i prekrivaju crijepovima ili pločama kao i kod uobičajene gradnje. Najvažnije je osigurati da se težina krova ravnomjerno rasporedi po slamnatim zidovima kako ne bi došlo do neravnomjernog stlačivanja slame. Krov je moguće izgraditi prije postavljanja slame kako bi gradnja bila što brža i kako bi slama što prije bila zaštićena od vremenskih nepravilnosti. Nakon postavljanja krova na nosive zidove od približno 250 cm, uobičajeno je da se zidovi pod pritiskom slegnu i do 10 cm. Zbog toga je vrlo važno koristiti najkomprimiranije bale koje su dostupne, dobro učvrstiti bale trakama ili žicama i ne nanositi žbuku nekoliko tjedana nakon postavljanja krovišta.

Za gradnju nosivih i pregradnih zidova također se mogu koristiti ploče i blokovi od usitnjene i prešane slame. Ploče su najčešće debljine 50 mm i pružaju izuzetnu toplinsku i zvučnu izolaciju. U proizvodnji ovakvih ploča se ne koriste spojevi na bazi formaldehida i ne sadrže hlapive organske spojeve. Proizvodnja ovakvih materijala je potpuno ekološka jer se slama komprimira pri visokim temperaturama uz mali dodatak veziva na bazi vode. Najveća prednost korištenja blokova i ploča je mogućnost narudžbe materijala točno određenih dimenzija.

2.3. Toplinska svojstva materijala

Poznavanje toplinskih svojstava materijala vrlo je bitno za njihovu tehničku primjenu. Toplinska svojstva materijala prirodno se pojavljuju pri opisu fenomena prijenosa topline, posebice pri proučavanju nestacionarnih procesa i raspodjele temperature u čvrstom materijalu. Jednadžba očuvanja (toplinske) energije u kontrolnom volumenu (II. Fourierov zakon vođenja topline, jednadžba (1)) podrazumijeva da je poznata toplinska vodljivost materijala, $\lambda / \text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ i toplinska difuzivnost materijala, $a / \text{m}^2 \text{s}^{-1}$.

$$\nabla^2 T + \frac{q}{\lambda} = \frac{1}{a} \cdot \frac{\delta T}{\delta t} \quad (1)$$

Toplinska svojstva bala slame kao građevnog materijala uvelike ovise o vrsti i gustoći pakiranja slame kao i o sadržaju vlage. Zbog nehomogenosti materijala, potrebno je modificirati standardne metode određivanja toplinskih svojstava koje se najčešće primjenjuju za ispitivanje homogenih materijala.

2.3.1. Definicije

Specifični toplinski kapacitet ($c_p, \text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$) tijela je količina topline koju tijelo treba primiti da bi mu se temperatura podigla za jedan stupanj, odnosno:

$$c_p = \frac{Q}{m \Delta T} \quad (2)$$

gdje je: $c_p =$ specifični toplinski kapacitet, $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$

$Q =$ topline koju je potrebno dovesti tijelu, J

$m =$ masa tijela, kg

$\Delta T =$ razlika konačne i početne temperature tijela, K

Tijela s malim toplinskim kapacitetom zagrijevaju se brzo, dok se tijela s relativno velikim kapacitetom zagrijevaju sporije.

Toplinska vodljivost (λ , $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$): fizikalno svojstvo materijala koje predstavlja količinu topline u jedinici vremena (W) koja prođe kroz presjek materijala debljine 1 m i površine 1 m^2 pri temperaturnoj razlici između obje plohe 1 K pri standardnim uvjetima. Što je vrijednost λ manja, slabija je i toplinska vodljivost, a to znači i da takav zid nudi bolju toplinsku zaštitu.

Tablica 1. Toplinske vodljivosti materijala

TVAR	$\lambda/\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
bakar	386
aluminij	204
meki čelik	64
beton	1,4
Pyrex staklo	1,09
polivinil-klorid (PVC)	0,092
BALIRANA SLAMA	0,035 - 0,090
pluto	0,043
staklena vuna	0,038
polistiren	0,028
zrak	0,027

Bitno je napomenuti da toplinska vodljivost jako ovisi o gustoći bala slame o čemu će biti riječi u daljnjem dijelu ovog rada.

Toplinska difuzivnost (a , m^2/s) opisuje dinamičko ponašanje materijala, a povezuje specifični toplinski kapacitet, toplinsku vodljivost i gustoću materijala.

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad (3)$$

gdje je: a = toplinska difuzivnost, m^2/s

ρ = gustoća materijala, kg/m^3

c_p = specifični toplinski kapacitet, $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$

2.3.2. Toplinska svojstva slame

McCabe (1994.) je otkrio da izolacijska svojstva slame ovise o orijentaciji vlakana slame. Vlakna mogu biti postavljena horizontalno ili vertikalno s obzirom na smjer prijenosa topline. Trožično vezana bala slame ima dimenzije 59 x 40 x 105 cm što znači da se pomoću njih mogu graditi zidovi debljine 59 ili 40 cm. Lakše i praktičnije su dvožične bale koje su dimenzija 46 x 36 x 92 cm. McCabe je izmjerio da trožične bale pšenične slame imaju toplinsku vodljivost između 0,032 i 0,035 $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ dok je vrijednost toplinske vodljivosti za dvožične bale otprilike 0,042 $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Razlika u toplinskim vodljivostima u ova dva slučaja je uzrokovana različitim gustoćama bala slame.

McCabe je ispitivao toplinska svojstva bala pšenične i ječmene slame različitih gustoća. Za ispitivanje svojstava, korištene su bale debljine 48 cm.

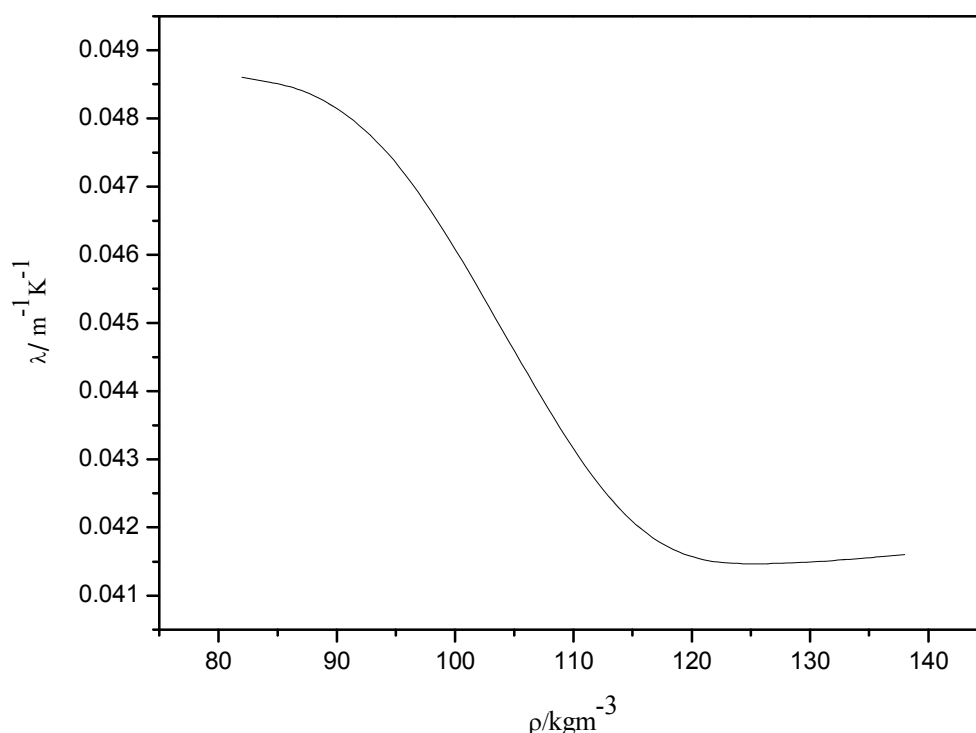
Rezultati ispitivanja svojstava pšenične slame prikazani su u sljedećoj tablici:

Tablica 2. Toplinska svojstva bala pšenične slame pri različitim gustoćama ⁴

Gustoća, kgm^{-3}	Specifični toplinski kapacitet, $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$	Volumni specifični toplinski kapacitet, $\text{Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$	Toplinska vodljivost, $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$	Toplinska difuzivnost, mm^2s^{-1}
82	2000	164000	0,0486	0,30
95	2000	190000	0,0482	0,25
113	2000	226000	0,0416	0,18
125	2000	251000	0,0414	0,16
138	2000	276000	0,0416	0,15

Istraživanja su provedena na pet bala pšenične slame različite gustoće. Iz tablice se može uočiti da volumni specifični toplinski kapacitet raste s porastom gustoće uzorka. Porast od 112 $\text{kJm}^{-3}\text{K}^{-1}$ između uzoraka najmanje i najveće gustoće upućuje na to da gustoća jako utječe na volumni specifični toplinski kapacitet. ⁴

Toplinska vodljivost slame se smanjuje s porastom gustoće te pri određenoj gustoći postiže minimum. Daljnjim porastom gustoće, toplinska vodljivost će prvo stagnirati na minimalnoj vrijednosti, a zatim će se početi povećavati.



Slika 6. Ovisnost toplinske vodljivosti o gustoći slame

Ovakvo svojstvo (ponašanje) slame se često uspoređuje s oblikom kuke (engl. hook shaped behaviour) te se taj izraz vrlo često koristi u stranoj literaturi.

Toplinska difuzivnost se smanjuje s povećanjem gustoće materijala. Iz jednadžbe (3) možemo vidjeti da je toplinska difuzivnost obrnuto proporcionalna umnošku specifičnog toplinskog kapaciteta i gustoće materijala. S obzirom da je specifični toplinski kapacitet konstantan, povećanjem gustoće materijala, smanjivat će se toplinska difuzivnost.

Rezultati ispitivanja svojstava ječmenih bala slame prikazani su u tablici 3.

Tablica 3. Toplinska svojstva ječmenih bala slame pri različitim gustoćama ⁴

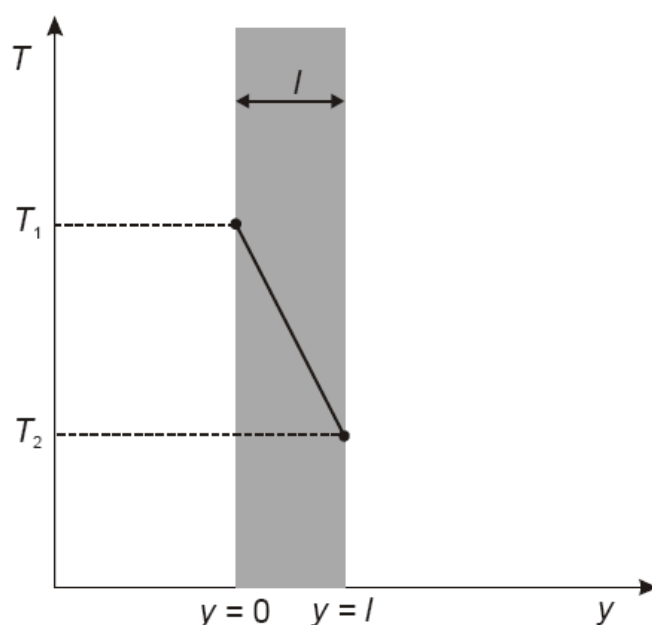
Gustoća, kgm⁻³	Specifični toplinski kapacitet, Jkg⁻¹K⁻¹	Volumni specifični toplinski kapacitet, Jm⁻³K⁻¹	Toplinska vodljivost, Wm⁻¹K⁻¹	Toplinska difuzivnost, mm²s⁻¹
69	2000	138000	0,0539	0,31
79	2000	158000	0,0404	0,26
85	2000	170000	0,0398	0,23
92	2000	184000	0,0380	0,21
98	2000	196000	0,0353	0,18

Iz tablice se može vidjeti da se povećanjem gustoće povećava volumni specifični toplinski kapacitet slično kao i kod pšeničnih bala. Toplinska vodljivost ječmenih bala je u pravilu niža od toplinske vodljivosti pšeničnih bala pri istoj gustoći. Pretpostavlja se da je uzrok tome različita građa ječmene i pšenične slame. Toplinska vodljivost i toplinska difuzivnost se smanjuju povećanjem gustoće bala slame.

2.4. Procesi prijenosa topline

2.4.1. Kondukcija

Prijenos topline kondukcijom odigrava se uslijed postojanja temperaturnih gradijenata unutar materijala. Karakterističan je za čvrsta tijela, a ovisan o fizikalnim svojstvima tvari, geometrijskim karakteristikama te o lokalnim razlikama u temperaturi. Prisutan je i kod kapljevina i plinova u mirovanju. S obzirom da se prijenos odvija isključivo prijenosom kinetičke energije s molekula na molekulu, nema promjene strukture materijala tijekom prijenosa topline. Toplina se spontano prenosi s područja više na područje niže temperature.



Slika 7. Prikaz prijenosa topline mehanizmom kondukcije kroz jednoslojni materijal ¹⁶

2.4.2. Konvekcija

Prijenos topline konvekcijom uzrokovan je gibanjem fluida. Količina prenesene topline bitno ovisi i o hidrodinamičkim uvjetima jer nije svejedno radi li se o laminarnom ili turbulentnom gibanju fluida. Razmatraju se dva granična slučaja gibanja fluida:

1.) Prirodna konvekcija - gibanje fluida uzrokovano je razlikama u gustoći fluida. Uslijed gravitacije i temperaturnog gradijenta unutar procesnog prostora javlja se pokretačka sila za

gibanje fluida. Opće je poznata činjenica da se s rastom temperatura fluida smanjuje njegova gustoća. Zbog prirodne sile teže, fluid veće gustoće (hladniji) struji prema dolje, a fluid manje gustoće (topliji) struji prema gore. Pomoću ove činjenice može se objasniti većina prirodnih pojava.

2.) Prisilna konvekcija - gibanje fluida uzrokovano je vanjskom silom, npr. ventilatorom, miješalom, pumpom ili strujanjem uslijed pada tlaka.

Na proces prijenosa topline utječu fizikalna svojstva fluida te geometrijske i hidrodinamičke karakteristike promatranog sustava. Pri zagrijavanju gibajućeg fluida, osim formiranja hidrodinamičkog graničnog sloja, dolazi do formiranja toplinskog graničnog sloja koji predstavlja glavni otpor prijenosu topline.

2.4.3. Radijacija

Prijenos topline radijacijom, za razliku od konvekcije i kondukcije, ostvaruje se elektromagnetskim valovima između dviju površina različite temperature medijem koji omogućuje taj prijenos. Uzrokovan je intramolekularnim i atomskim promjenama zbog čega se različiti oblici energije pretvaraju u energiju elektromagnetskog zračenja uz uvjet da je temperatura izvora veća od 0 K. Uglavnom se odvija u infracrvenom spektru, a intenzitet zračenja ovisi o temperaturi i valnoj duljini. Pri jako visokim temperaturama tijela mogu emitirati, uz infracrveno zračenje, vidljivu svjetlost i ultraljubičasto zračenje.

Zbog izrazite nehomogenosti i poroznosti bala slame, prijenos topline se odvija kombinacijom različitih mehanizama koji uključuju kondukciju kroz čvrstu fazu, konvekciju kroz plinovitu fazu, mehanizam isparavanja i kondenzacije vlage te radijaciju s površine krute faze.

Zbog složenog mehanizma prijenosa topline kroz ovakvu vrstu materijala, ukupni proces prijenosa topline moguće je jednostavnije opisati modelom mehanizma kondukcije uz neku prividnu (efektivnu) vrijednost parametra kondukcije. Zbog toga je nužno napomenuti da su pravilniji nazivi tih toplinskih parametara:

- prividna toplinska vodljivost
- prividna toplinska difuzivnost materijala

2.5. Metode određivanja toplinske vodljivosti

Razvijeno je više eksperimentalnih metoda koje prema principu mjerenja možemo podijeliti na metode u ustaljenom stanju (statičke) i dinamičke.^{5,6}

2.5.1. Metode u ustaljenom stanju

Metode za određivanje toplinske vodljivosti u ustaljenom stanju temelje se na primjeni

I. Fourierovog zakona prijenosa topline:

$$Q = \lambda A \frac{\Delta T}{\Delta x} \cdot t \quad (4)$$

gdje je: Q = količina topline, J

λ = toplinska vodljivost, $\text{Wm}^{-1} \text{K}^{-1}$

A = poprečni presjek, m^2

ΔT = temperaturna razlika, K

Δx = debljina, m

t = vrijeme, s

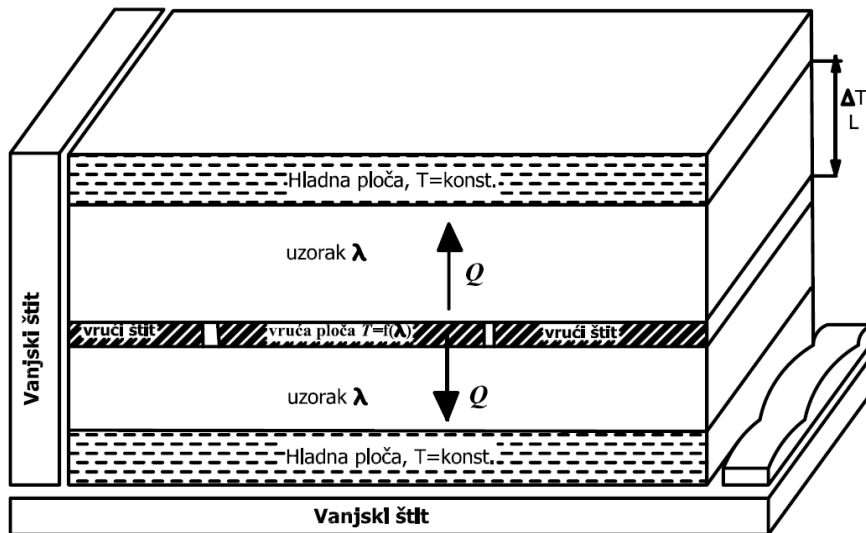
Metode u ustaljenom stanju zahtijevaju laboratorijske uvjete (npr. izvrsnu toplinsku izolaciju, toplinski ponor i sl.), najčešće su dugotrajne pa nisu pogodne za materijale u kojima može doći do transporta vode. Prednosti ovih metoda su jednostavnost modela te mala mjerna nesigurnost ($\sim 2\%$).

2.5.1.1. Metoda zaštićene vruće ploče

Metoda vruće ploče (eng. hot plate) je jedna od metoda mjerenja toplinskih svojstava koja može biti i statička i dinamička. Statička metoda vruće ploče je metoda koja omogućuje računanje toplinske vodljivosti nakon stvaranja stalnog toplinskog toka kroz uzorak.

Toplinski tok se ostvaruje pomoću grijača (ploče) kroz koji protječe struja konstantne snage. Grijač se postavlja između dva sloja uzorka, a oko njega se postavljaju vrući i vanjski šitovi.

Oni su nužni za održavanje jednodimenzionalnosti toka topline zbog toga što se štitom smanjuju gubici topline s grijala i uzorka u radijalnom smjeru. S gornje i donje strane uzorka se postavljaju hladne ploče koje imaju konstantnu temperaturu kako bi se osigurao konstantan toplinski tok.⁷



Slika 8. Shematski prikaz mjernog postava statičke metode zaštićene vruće ploče⁸

Toplinska vodljivost se računa na temelju poznate količine topline Q , temperaturne razlike kroz uzorak ΔT , i dimenzija uzorka prema sljedećoj jednadžbi:

$$\lambda = \frac{Q}{A} \frac{\Delta x}{\Delta T} \quad (5)$$

Složenost ovakve aparature i dugotrajnost mjerenja je uzrok sve učestalijeg korištenja dinamičkih metoda.

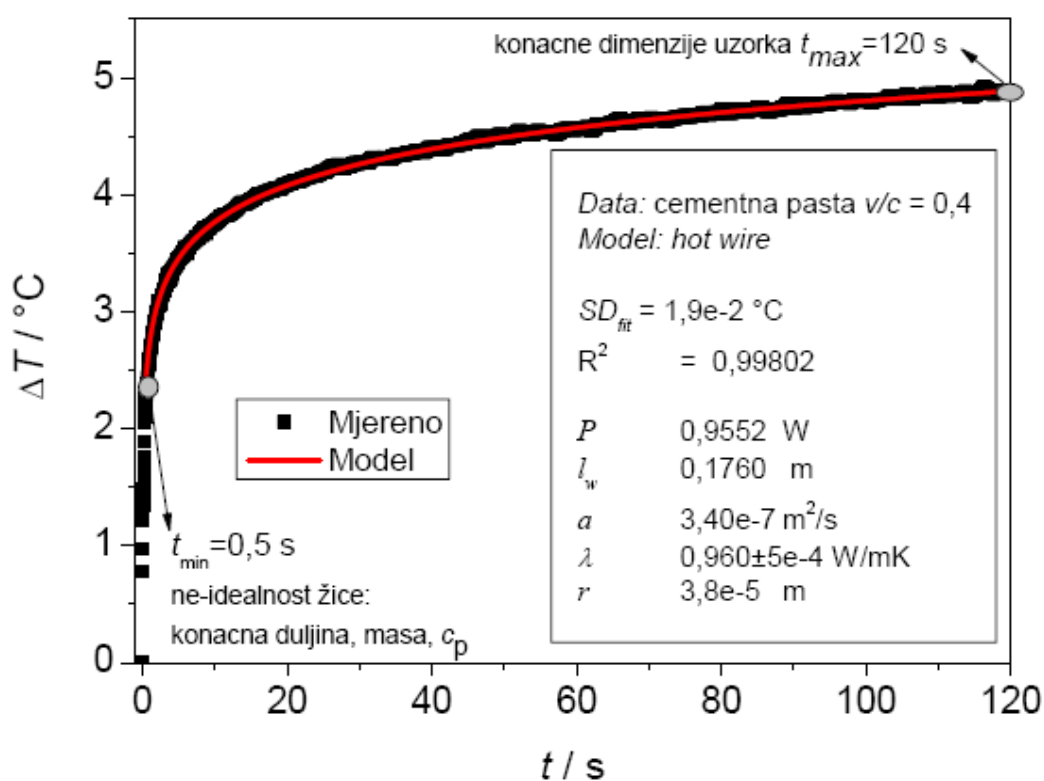
2.5.2. Dinamičke metode

Dinamičke metode temelje se na analizi odziva prijelaznih pojava prijenosa topline. Prednosti dinamičkih metoda su izvodljivost u realnim uvjetima, jednostavnija aparatura i kratko vrijeme ispitivanja. Zbog kraćeg vremena ispitivanja, ove metode se mogu koristiti i za ispitivanje materijala koji sadrže vlagu. Nedostaci dinamičkih metoda su složenost obrade podataka i veća mjerna nesigurnost ($\sim 4\%$).

Najčešće korištene dinamičke metode za određivanje toplinskih svojstava materijala su metoda vruće žice i metoda ploče.

2.5.2.1. Metoda vruće žice

Metodom vruće žice (engl. hot-wire) mogu se određivati toplinska svojstva krutina, prašaka i fluida pri velikom rasponu temperatura. Temelji se na zagrijavanju žice strujom konstantne snage i mjerenju porasta temperature okolnog materijala. Žica mora biti postavljena tako da ostvaruje što je moguće bolji kontakt s uzorkom. Na osnovu izmjerenih podataka, parova točaka: vrijeme i temperatura, prema poznatom modelu, određuje se toplinska vodljivost i toplinska difuzivnost materijala, te se uz poznatu gustoću može izračunati i njegov toplinski kapacitet.



Slika 9. Primjer procjene toplinske difuzivnosti materijala ^{5,6}

Toplinski tok se stvara u određenom vremenskom intervalu kroz dugu i tanku žicu (jednakih svojstava) smještenu u kalup. Temperaturni odziv se određuje mjerenjem promjene otpora iste žice ili drugim temperaturnim osjetilom (termoparom). Metoda je dinamička pa je mjerenje

moguće ponavljati u kratkim vremenskim intervalima i dobiti vremensku ovisnost toplinskih svojstava istraživanog materijala.

Moguće su tri osnovne izvedbe: poprečne žice (engl. Cross wire, termoparom se mjeri temperatura grijače žice), otpornička žica (grijača žica je i temperaturno osjetilo, engl. Resistive wire) i paralelne žice (engl. Parallel wire, termoparom se mjeri temperatura materijala na udaljenosti r od grijače žice).

Izvedba s otporničkom žicom ima najmanju mjernu nesigurnost zbog toga što ona služi i za zagrijavanje i za mjerenje temperature preko promjene otpora. Druge izvedbe zahtijevaju točno poznavanje udaljenosti temperaturnog osjetila od grijača.

2.5.2.2. Metoda vruće ploče

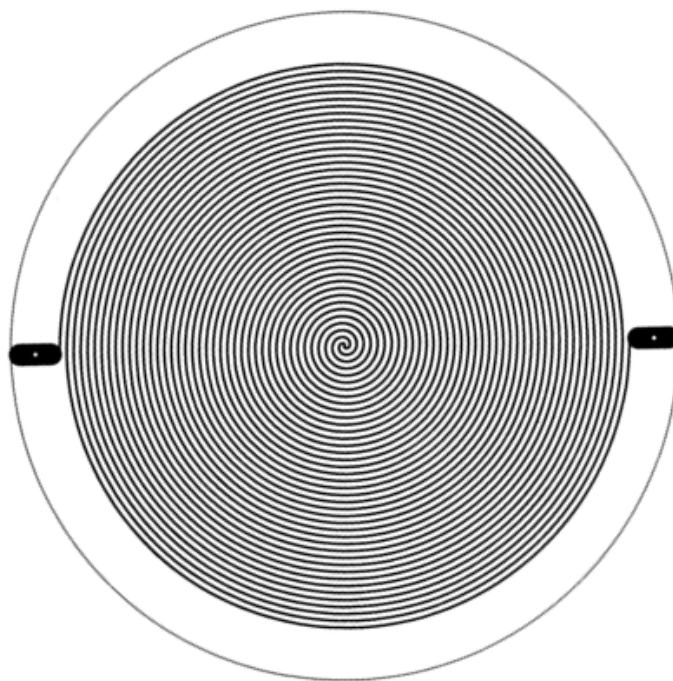
Metoda vruće ploče je dinamička metoda za mjerenje toplinske vodljivosti i toplinske difuzivnosti. Najveća prednost ove metode je mogućnost ispitivanja krutina, gelova i tekućina širokog raspona toplinske vodljivosti: od $0,005 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ do $500 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Također, bitno je naglasiti da je ova metoda kratkotrajna i precizna te da je vrlo jednostavna priprema uzorka. Kao i kod statičke metode, između dva sloja uzorka postavlja se grijač (vruća ploča) kroz koji protječe struja poznate snage.

2.5.2.3. Gustaffsonova metoda vruće ploče

Promjena temperature koja se mjeri na samom grijaču je direktno ovisna o toplinskim svojstvima uzorka. Materijali koji imaju veliku toplinsku vodljivost će odvoditi više topline s grijača pa će se na njemu sporije razvijati temperatura. Analizirajući promjenu temperature tijekom vremena, moguće je odrediti toplinsku vodljivost ispitivanog materijala.

Prve vruće ploče pomoću kojih su se određivala toplinska svojstva materijala su bile napravljene od tanke metalne folije četvrtastog oblika (engl. hot strip) te su se najčešće koristile za ispitivanje tekućina. Ploča ne mora biti četvrtastog oblika pa se danas uobičajeno

koriste okrugle vruće ploče (engl. hot disk). Metalni vodiči, koji su izvor topline, se utiskuju na polimernu ploču kao bifilarna spirala ili kao skup koncentričnih kružnica koje imaju zajedničko središte. Preko vodiča se nanosi tanki dielektrični izolacijski film ($\sim 25\mu\text{m}$) koji služi za zaštitu i osigurava preciznost mjerenja.



Slika 10. Shematski prikaz vruće ploče

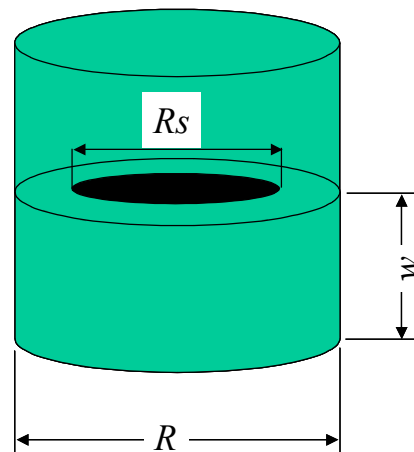
Prema Gustafssonovoj metodi, geometrijske karakteristike bifilarne spirale se u proračunu aproksimiraju kao točno definirani broj (m) koncentričnih kružnica od kojih najveća ima polumjer (r).

Prije početka mjerenja vrlo je bitno odrediti veličinu vruće ploče. Veličina se određuje prema pretpostavljenim vrijednostima toplinske vodljivosti i dimezijama uzorka. Uzorak mora biti dovoljno velik da bude reprezentativan i da osigura da za vrijeme mjerenja ne dođe do utjecaja okoline na mjerenje temperature.

Za određivanje veličine vruće ploče se koriste sljedeći uvjeti:

$$Rs - R > 5\sqrt{at_{\max}} \quad (6)$$

$$w > 2,5\sqrt{at_{\max}} \quad (7)$$



Slika 11. Prikaz postavljanja vruće ploče između dva uzorka

gdje je: Rs = promjer vruće ploče, mm

R = promjer uzorka, mm

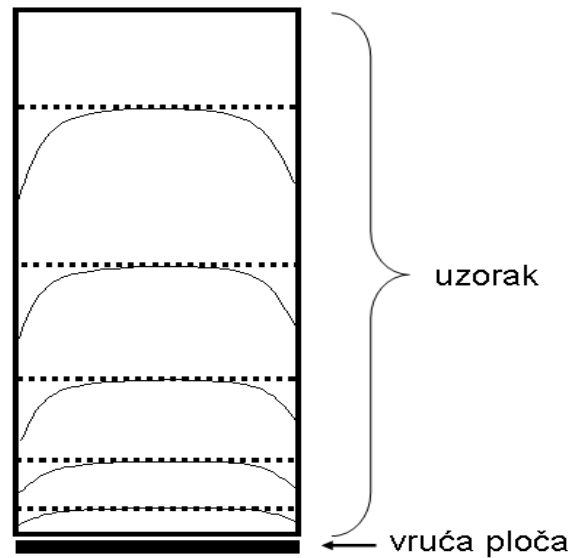
w = debljina uzorka, mm

a = pretpostavljena toplinska difuzivnost, m^2/s

$t_{\max}$ = pretpostavljeno maksimalno vrijeme mjerenja, s

Navedeni uvjeti su empirijski te se mogu razlikovati ako se koriste različite metode ispitivanja ili ako se radi o specifičnim materijalima. Uvjeti služe samo kao pomoć pri dimenzioniranju vruće ploče.

Maksimalno vrijeme mjerenja je vrijeme potrebno da toplinski tok dođe do ruba uzorka tj. ono vrijeme tijekom kojega se smatra da neće doći do utjecaja okoline na mjerenje.

Slika 12. Prikaz prostiranja topline kroz uzorak⁸

2.5.2.4. Model Gustaffsonove metode vruće ploče

Kao što je već navedeno, metalni vodiči u bifilarnoj spirali se aproksimiraju kao broj (m) koncentričnih kružnica od kojih najveća ima polumjer (r).

Za proračun je nužno uvesti integracijsku varijablu (σ) koja povezuje toplinsku difuzivnost, vrijeme i polumjer vruće ploče:

$$\sigma^2 = \frac{a(t - t')}{r^2} \quad (8)$$

gdje je t = vrijeme, s

t' = početak zagrijavanja vruće ploče, s

U slučaju kada je $t'=0$, odnosno, kada je za početak zagrijavanja vruće ploče uzeto kao početak mjerenja, dobije se sljedeći izraz:

$$\sigma = \frac{\sqrt{\lambda t}}{r} = \tau \quad (9)$$

gdje je τ karakteristični vremenski omjer koji je bezdimenzijski parametar koji služi za korekciju vremena početka zagrijavanja ploče. U idealnom slučaju, vruća ploča se počne zagrijavati istovremeno s početkom prolaska struje kroz metalne vodiče. U stvarnosti dolazi do kasnijeg zagrijavanja zbog neidealnosti vodiča, toplinskog kapaciteta i mase ploče te zbog neidealnosti izvora struje.⁷

Promjena temperature na vrućoj ploči se računa prema sljedećoj jednadžbi:

$$\Delta T(\tau) = \frac{P_0}{\pi^{3/2} r \lambda} D(\tau) \quad (10)$$

gdje je: P_0 = snaga vruće ploče, W

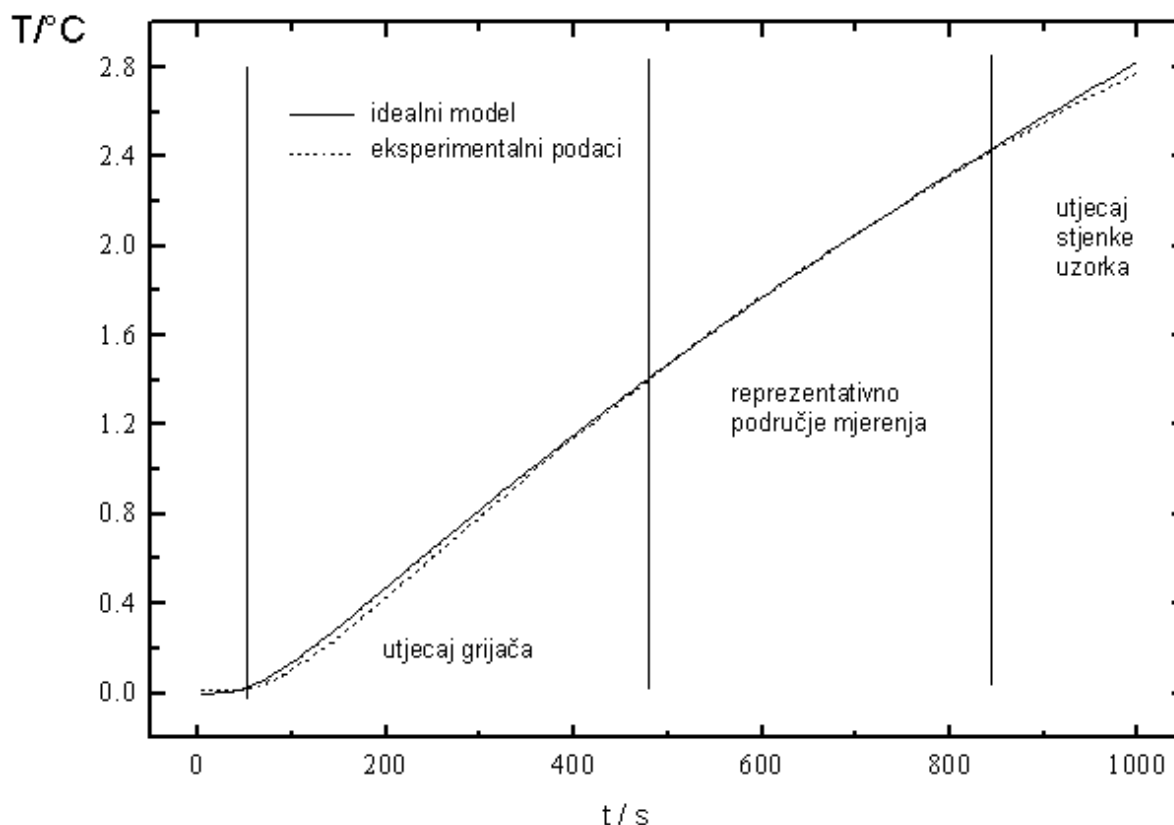
$D(\tau)$ = bezdimenzijsko vrijeme

Bezdimenzijsko vrijeme se računa prema sljedećoj složenoj jednadžbi:

$$D(\tau) = \frac{1}{m^2 (m+1)^2} \int \frac{d\sigma}{\sigma^2} \sum_{k=1}^m k \sum_{l=1}^m l e^{-((k^2+l^2)/m^2)/4\sigma^2} I_0\left(\frac{kl}{2m^2\sigma^2}\right) \quad (11)$$

gdje je I_0 modificira Besselova funkcija nultog reda.

Pomoću ovog modela se može predvidjeti temperaturni odziv materijala određene toplinske vodljivosti pri zadanim uvjetima. Podatke dobivene modelom i eksperimentalne podatke zatim obrađujemo metodama nelinearne regresije. Na taj način se izračuna toplinska vodljivost pomoću koje se mogu izračunati toplinska difuzivnost i specifični toplinski kapacitet (jednadžbe (2) i (3)).



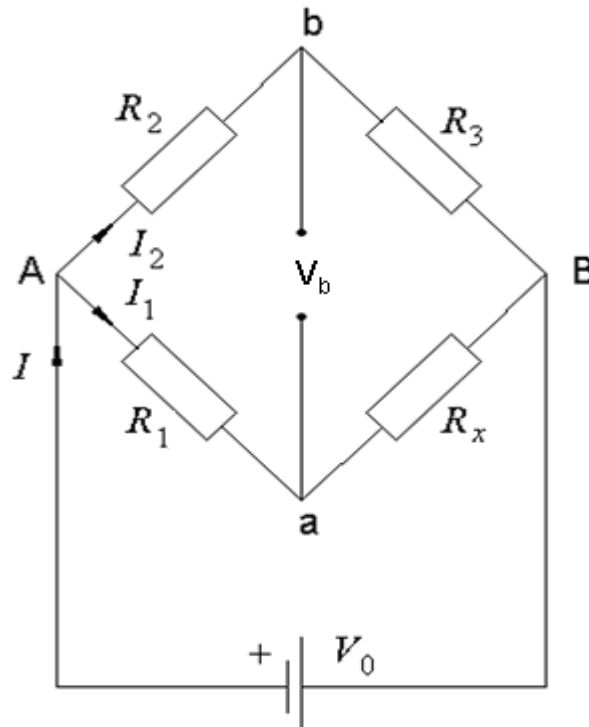
Slika 13. Prikaz odstupanja eksperimentalnih podataka od idealnog modela⁷

Prilikom obrade podataka metodama nelinearne regresije, vrlo je bitno odabrati reprezentativno područje. Kao što je već rečeno, na samom početku mjerenja dolazi do odstupanja zbog utjecaja neidealnosti grijača, toplinskog kapaciteta i mase ploče. Kako vrijeme mjerenja odmiče, tako sve više do izražaja dolazi utjecaj okoline. Reprezentativno područje je ono područje u kojemu dolazi do najboljeg preklapanja krivulja modela s rezultatima mjerenja uz uvjet da se izbjegava sam početak i kraj mjerenja. Odstupanja modela od izmjerenih podataka najčešće nisu velika pa subjektivnost pri odabiru reprezentativnog područja neće puno utjecati na konačni rezultat.

2.5.2.5. Mjerenje temperaturnog odziva vruće ploče

Prolaskom struje kroz metalne vodiče, oni se počinju zagrijavati. S obzirom da su temperatura i otpor vodiča na vrućoj ploči povezani, promjena temperature vodiča se može odrediti mjerenjem promjene otpora vruće ploče. Mjerenje otpora vruće ploče se može izvesti

spajanjem ploče u neuravnoteženi Wheatstoneov most. Wheatstoneov je most strujni krug koji služi za mjerenje otpora ili malih promjena otpora. Sastoji se od izvora električne struje, galvanometra i četiri otpora, od kojih su tri poznata.



Slika 14. Shema Wheatstoneovog mjernog mosta

R_1 , R_2 i R_3 sa slike su otpornici poznatog otpora, V_0 je napon izvora struje, a V_b je napon neuravnoteženog mostnog spoja. Uz poznate otpore i napon izvora struje, dovoljno je pratiti promjenu napona neuravnoteženog mostnog spoja kako bi se mogla izračunati promjena otpora vruće ploče prema sljedećoj jednadžbi:

$$R_x = \frac{[V_b R_1 (R_2 + R_3) + V_0 R_1 R_3]}{[V_0 R_2 - V_b (R_2 + R_3)]} \quad (12)$$

Temperatura vruće ploče se zatim može izračunati iz jednadžbe:

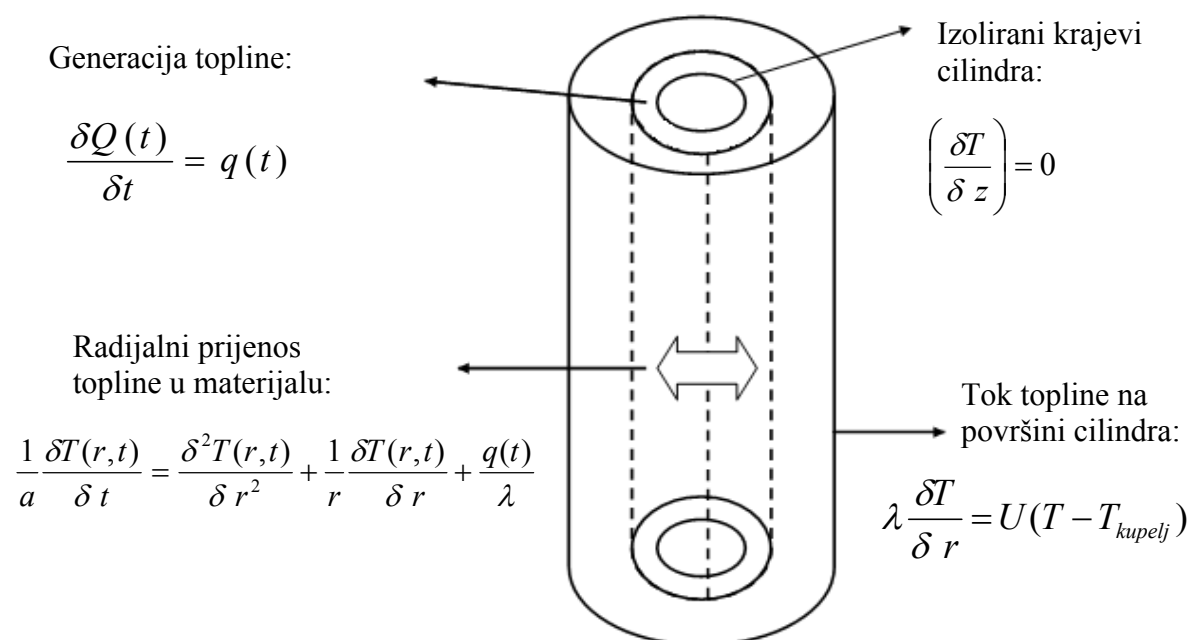
$$R_x = R_{x,0} (1 + \alpha \Delta T) \quad (13)$$

Gdje je $R_{x,0}$ početni otpor vruće ploče, a α temperaturni koeficijent otpora vruće ploče koji u slučaju bakra iznosi $0,0039 \text{ K}^{-1}$.

2.5.2.6. Određivanje toplinske difuzivnosti izlaganjem materijala skokovitoj promjeni temperature

Toplinsku difuzivnost materijala moguće je odrediti praćenjem temperaturnog odziva valjkastog uzorka pri nagloj pobudi plašta (stijenke) materijala.^{5,6} Ova metoda je je jednostavna i učinkovita i ne zahtijeva skupocjene i sofisticirane uređaje. Za mjerenje nisu potrebni veliki temperaturni skokovi te se mogu ispitati i vrlo osjetljivi materijali.

Za uspješan opis procesa prijenosa topline što jednostavnijim matematičkim modelom definirana je geometrija beskonačnog valjkastog uzorka, što je praktično postignuto velikim odnosom visine i polumjera valjka ($h/R > 10$), a krajevi valjka zatvoreni su izolacijskim materijalom. Ako se topline prenosi samo kroz plašt valjka, a ne i kroz baze, tada se temperatura mijenja samo u radijalnom smjeru, tj, $T = T(r, t)$.



Slika 15. Matematički prikaz nestacionarnog prijenosa topline u beskonačnom valjku.

Na osnovu eksperimentalnog postava pretpostavljeno je da raspodjela temperature u uzorku slijedi jednodimenzionalni model nestacionarnog prijenosa topline u beskonačnom valjkastom uzorku:

$$\frac{1}{a} \frac{\delta T(r, t)}{\delta t} = \frac{\delta^2 T(r, t)}{\delta r^2} + \frac{1}{r} \frac{\delta T(r, t)}{\delta r} + \frac{q_v}{\lambda} \quad (14)$$

Uz sljedeće uvjete:

početni uvjet: $T(r, t = 0) = T_0$

rubni uvjet: $T(r = R, t) = T_R$

uvjet simetrije: $\frac{\delta T}{\delta r}(r = 0, t) = 0$

gdje je: q_v – volumna generacija topline, Wm^{-3}

R – polumjer valjka, m

Za materijale u kojima se ne odvijaju kemijske reakcije ili fazne promjene, volumni izraz generacije topline q_v (Wm^{-3}) u jednadžbi (10) je nula. Na početku, temperatura uzorka materijala ima određenu raspodjelu temperature $T(r, t \ll 0) = f(r)$. Nakon odgovarajućeg razdoblja stabilizacije temperature te bez generacije topline, u materijalu se postiže ujednačena temperatura $T(r, t = 0) = T_0$.

Za navedeni rubni uvjet, uz prijelaz topline sa fluida kupelji na stjenku materijala, U (Wm^{-2}) može se pretpostaviti da je temperatura materijala u doticaju sa stjenkom nosača uzorka jednaka temperaturi kupelji. To se eksperimentalno postiže tankom stjenkom cilindra velike toplinske vodljivosti te dobrim miješanjem fluida u kupelji.

Parcijalna diferencijalna jednačba (14) uz zadane rubne i početne uvjete ima sljedeće analitičko rješenje (ovisnost bezdimenzijske temperature o vremenu)⁶

$$\Theta(r_M, t) = \frac{T(r_M, t) - T_\infty}{T_i - T_\infty} = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\zeta_n} \frac{J_1(\zeta_n) J_0(\zeta_n r_M / R)}{J_0^2(\zeta_n) + J_1^2(\zeta_n)} \cdot e^{-\left(\frac{\zeta_n}{R}\right)^2 a t} \quad (15)$$

gdje je: Θ = bezdimenzijska temperatura

T_i = početna temperatura materijala, K

T_∞ = konačna temperatura materijala, K

r_M = radijalni položaj temperaturnog osjetila, mm

J_i = Besselova funkcija prve vrste i-tog reda

ζ_n = vrijednosti pozitivnih nultočki karakteristične jednačbe

$$\zeta_n J_1(\zeta_n) - \frac{UR}{\lambda} J_0(\zeta_n) = 0 \quad (16)$$

gdje je U koeficijent prolaza topline kroz stijenku materijala, W/m²K.

Red (15) vrlo brzo konvergira (uz visoki U) te se pokazalo dovoljnim uzeti prvih nekoliko članova reda. Računanjem karakterističnih vrijednosti Besselovih funkcija J_i uz dane vrijednosti eksperimentalnog postava r_M i R pojednostavljeni zapis jed. (15) glasi:

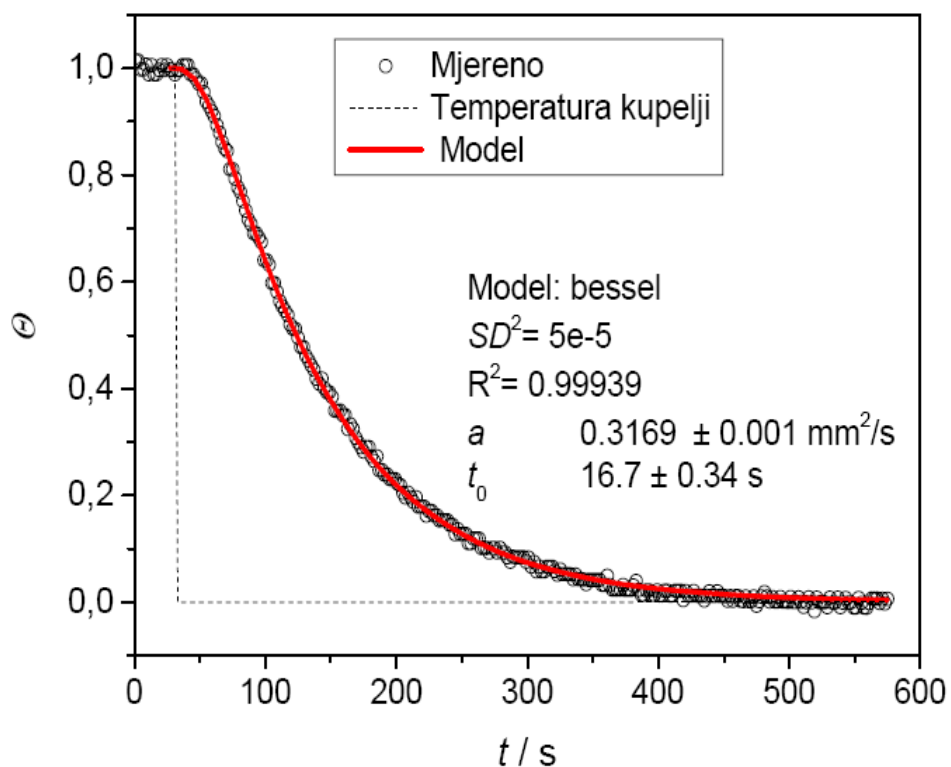
$$\Theta(t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp(-B_n a(t - t_0)) \quad (17)$$

gdje su vrijednosti konstanti A_n i B_n dobivene usporedbom jednačbi (17) i (15):

$$A_n\left(\frac{r_M}{R}\right) = \frac{2}{\zeta_n} \frac{J_1(\zeta_n) J_0(\zeta_n r_M / R)}{J_0^2(\zeta_n) + J_1^2(\zeta_n)} \quad (18)$$

$$B_n(R) = \left(\frac{\zeta_n}{R}\right)^2 \quad (19)$$

Parametar t_0 odgovara početku temperature pobude stijenke materijala.



Slika 16. Primjer procjene toplinske difuzivnosti materijala ^{5,6}

Ovisnosti bezdimenzijske temperature (Θ) o vremenu iz jednadžbi (15) i (17) se uspoređuju metodama nelinearne regresije. Vrijednosti bezdimenzijske temperature izračunate iz jednadžbe (15) predstavljaju eksperimentalne podatke dok jednadžba (17) predstavlja model procesa.

3. EKSPERIMENTALNI DIO

3.1. Uzorci

Mjerenja toplinske vodljivosti Gustaffsonovom metodom vruće ploče su provedena na dvožično povezanim balama pšenične slame približnih dimenzija 40x30x75 cm i gustoće 67 kgm⁻³. Gustoća je izračunata iz izmjerenih dimezija i mase uzorka bale. Kao referentni materijal, korišten je ekspanzirani polistiren deklarirane toplinske vodljivosti

$\lambda=0,039 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ i gustoće 14,5 kg/m³.



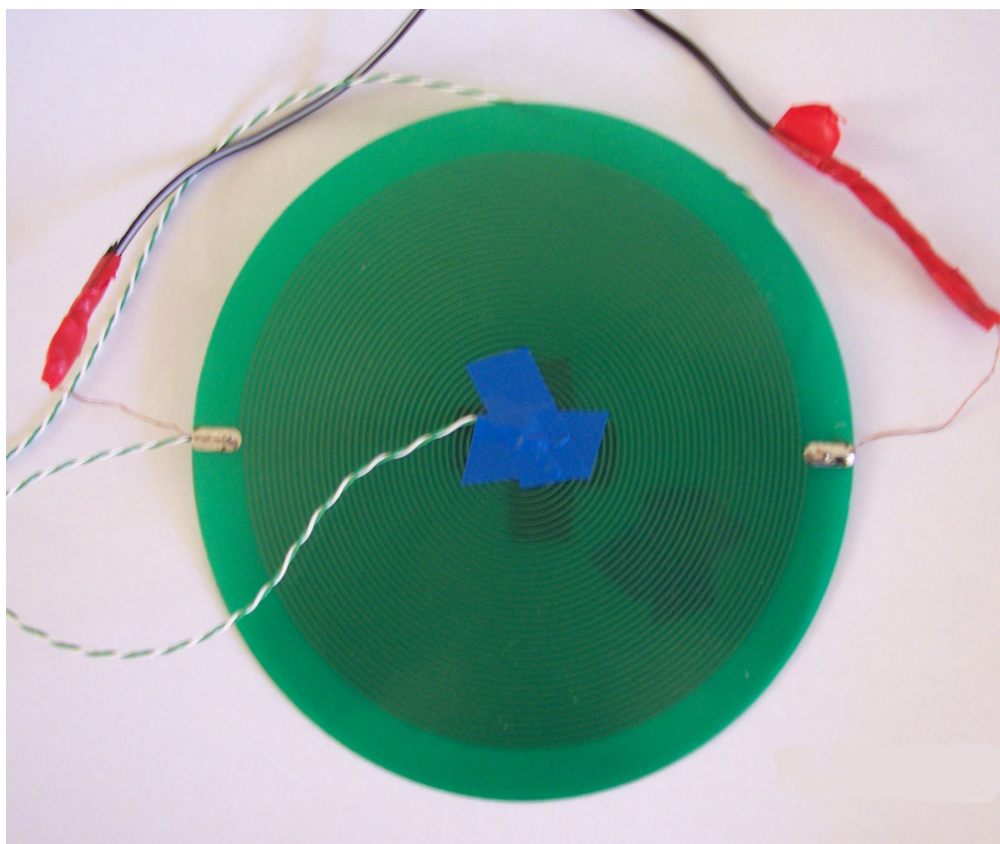
Slika 17. Dvožično povezana bala slame

Za mjerenje toplinske difuzivnosti izlaganjem materijala nagloj promjeni temperature, korištena je ustinjena slama nasuta u aluminijsku cijev. Slama je ustinjena tek toliko da se može nasuti u cijev, ali ne toliko da bi se bitno promijenila svojstva. Uzorci za određivanje toplinske difuzivnosti su približne gustoće 48 kgm⁻³. Zbog ispitivanja utjecaja sadržaja vlage na toplinsku difuzivnost slame, uzorci su duže vrijeme čuvani u prostorima s relativnim vlažnostima zraka od 44 i 60%.

3.2. Određivanje toplinske vodljivosti Gustaffsonovom metodom vruće ploče

Koristeći jednadžbe (6) i (7), izračunata je dimenzija vruće ploče kojom se mogu izvesti mjerenja na uzorcima zadanih dimezija. Zbog heterogenosti uzorka, poželjno je koristiti vruću ploču što većih dimenzija kako bi se izbjegle lokalne nejednolikosti materijala. Vruća ploča je izvedena tako da su bakreni vodiči debljine $35\text{ }\mu\text{m}$ tiskani na polimernu ploču promjera 15 cm u obliku bifilarnih spirala. Za potrebe modela prikazanog jednadžbama (10) i (11), bifilarna spirala je aproksimirana kao skup od 40 koncentričnih kružnica od kojih najveća ima promjer $12,7\text{ cm}$. Preko namotaja je nanesen zeleni lotstop lak koji služi kao zaštita i izolacija bakrenih vodiča.

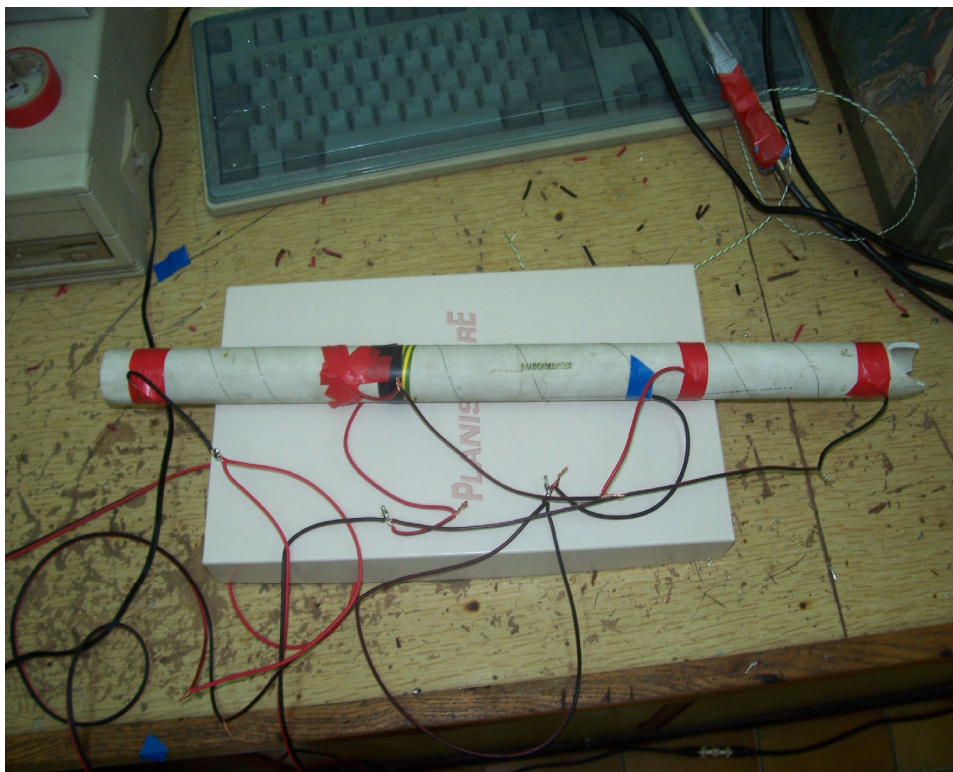
Na rubovima vruće ploče su napravljeni kontakti za spajanje ploče s neuravnoteženim Wheatstoneovim mjernim mostom.



Slika 18. Vruća ploča

Kao što je već navedeno, u poznate otpore i napon izvora struje, dovoljno je pratiti pomjenu napona neuravnoteženog mosnog spoja kako bi se mogla izračunati promjena otpora vruće ploče prema jednadžbi (12). Uz poznati početni otpor i temperaturni koeficijent otpora vruće ploče tj. bakrenih namotaja, moguće je izračunati promjenu temperature prema jednadžbi (13). Temperaturni koeficijent otpora (α) bakrenih namotaja iznosi $3,9 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

Otpornici su napravljeni namatanjem žice (Kanthal A) niskog temperaturnog koeficijenta otpora oko keramičke cijevi. Nakon mjerenja otpora, otpornici su lemljenjem povezani u neuravnoteženi Wheatstoneov mjerni most. Napravljeni su otpornici sljedećih otpora: $R_1 = R_2 = 9,3 \Omega$ i $R_3 = 9,4 \Omega$.



Slika 19. Otpornici R_1 , R_2 i R_3 spojeni u neuravnoteženi Wheatstoneov mjerni most

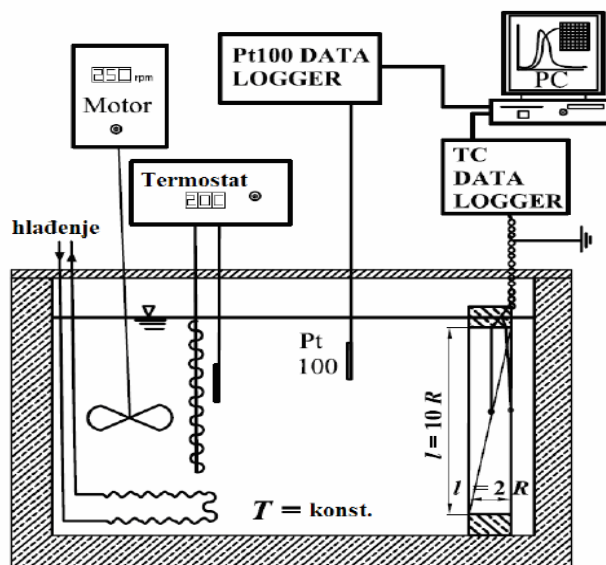
Neuravnoteženi Wheatstoneov mjerni most je spojen na ispravljač snage 1A s regulacijom napona (3-12V). Za potrebe mjerenja, ispravljač je bio podešen na napone od 3 i 4,5 V. Promjena napona neuravnoteženog mosnog spoja (V_b) mjerila se i zapisivala uređajem PICO Logger. Promjena temperature ploče kontrolirana je termoparovima K-tipa koji se spajaju na isti uređaj.

PICO Logger je uređaj koji je povezan s računalom na kojem se temperatura i napon zapisuju i prate (svakih 10 sekundi) pomoću programa PicoLog for Windows u obliku grafičkog i tabličnog prikaza. Hladno spojište termopara je spojeno na izotermni blok ulaznih konektora mjernog uređaja PICO Logger. Kako bi se ostvarila zadovoljavajuća kompenzacija hladnog spojišta treba spriječiti nagle promjene temperature izoternog bloka.

3.3. Mjerenje toplinske difuzivnosti izlaganjem materijala nagloj promjeni temperature

Mjerenje toplinske difuzivnosti izvodi se pomoću dvije vodene kupelji, aluminijske cijevi (ili kalupa) s vrlo tankom stijenkom, tankih termoparova i uređaja za akviziciju temperature. Uzorak je usitnjena slama gustoće 48 kg/m^3 koja je nasuta u aluminijsku cijev. Aluminijska cijev promjera 55 mm je posebno istokarena kako bi imala što tanju stijenku. U kalupu su postavljena 2 termopara tipa K (NiCr-AlCr, debljine 0,2 mm, 'grounded twisted-shielded wiring'). Termoparovi su postavljeni na polovini cijevi, jedan u osi cijevi i jedan na unutarnju stijenku. Cijev se zatvori, dobro izolira na rubovima i uroni u termostat. Mjerne žice izlaze kroz gornju bazu valjka koja je iznad razine vode u termostatiranoj kupelji. Temperatura uzorka mjeri se termoparom K-tipa uređajem PICO Logger.

Uzorak se izlaže skokovitoj promjeni temperature prebacivanjem iz jedne kupelji temperature T_1 u drugu temperature T_2 . Prije prebacivanja u drugu kupelj potrebno je ostvariti temperaturnu stabilizaciju (jednoliku temperaturu) uzorka u prvoj kupelji. Kod mjerenja, točan aksijalni položaj termopara ($r_M = 0 \pm 1 \text{ mm}$) osiguran je na način da je termopar smješten na polovici nategnute plastične žice (0,3 mm debljine) koja je poduprta dijagonalno pri bazama valjka.



Slika 20. Pojednostavljeni prikaz eksperimentalnog postava za mjerenje toplinske difuzivnosti materijala^{5,6}



Slika 21. Eksperimentalni postav za mjerenje toplinske difuzivnosti materijala

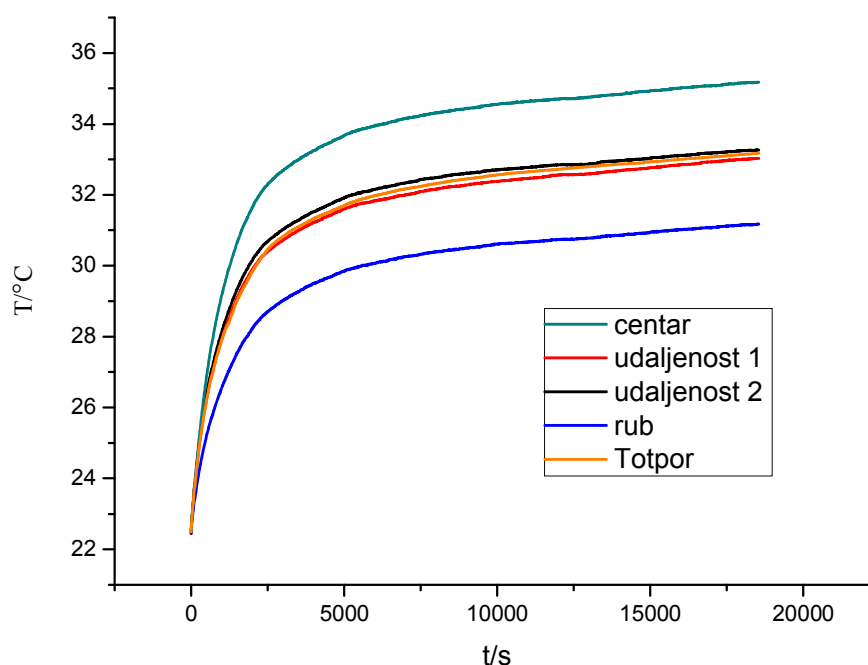
4. REZULTATI

4.1. Određivanje toplinske vodljivosti Gustaffsonovom metodom vruće ploče

4.1.1. Mjerenja na referentnom materijalu

Prva mjerenja toplinske vodljivosti napravljena su na ekspaniranom polistirenu deklarirane toplinske vodljivosti $\lambda = 0,039 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ i gustoće $14,5 \text{ kg/m}^3$. Tom referentnom materijalu je poznata toplinska vodljivost pa je pomoću njega istražen utjecaj grijača na mjerenje. Na grijač je postavljeno četiri termopara na različitim udaljenostima od središta kako bi se mogla vidjeti promjena temperature pojedinih dijelova grijača.

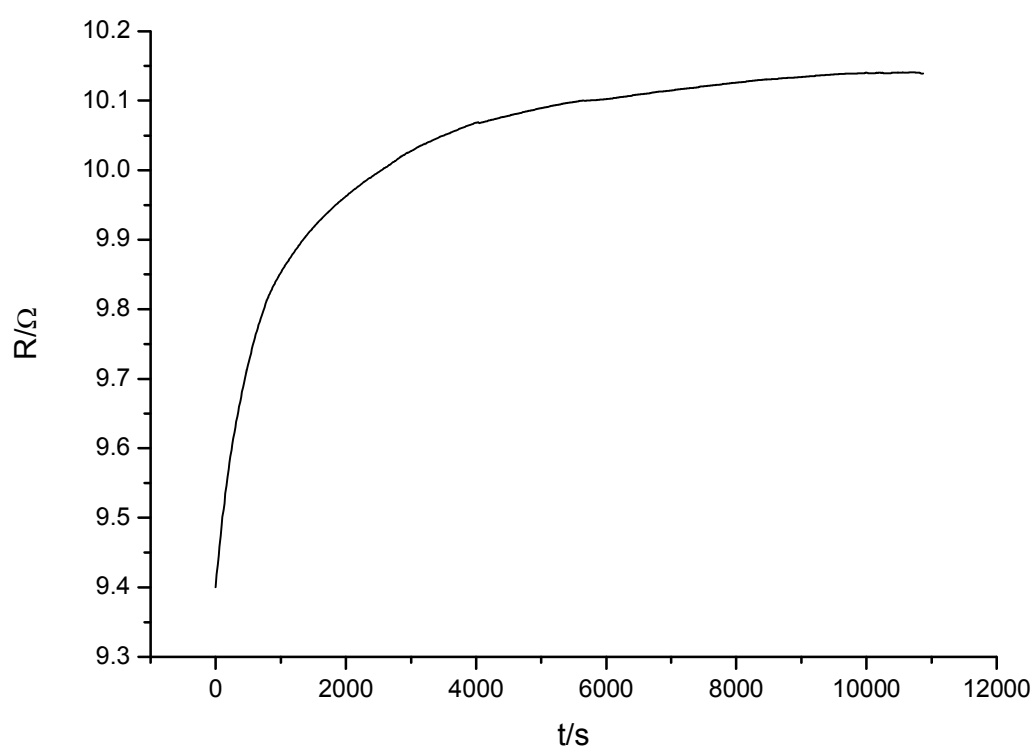
Primjer prikupljenih podataka tijekom jednog mjerenja na ekspaniranom polistirenu prikazana je na slici 22.



Slika 22. Temperatura pojedinih dijelova grijača tijekom mjerenja na ekspaniranom polistirenu

Zelena linija predstavlja odziv termopara koji je postavljen u samom centru grijača, crvena i crna odzive termoparova koji su postavljeni na približno istoj udaljenosti od centra grijača dok plava linija predstavlja odziv termopara koji je postavljen na samom rubu grijača. Narančastom linijom je označena temperatura vruće ploče izračunata preko promjene otpora.

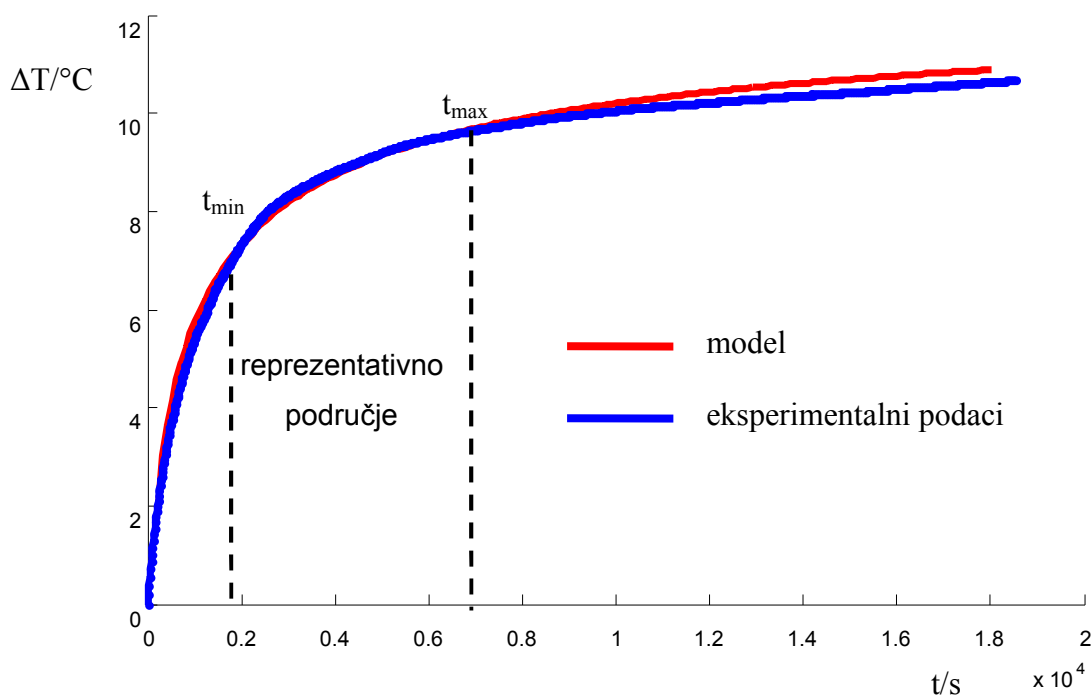
Zbog nejednolikog zagrijavanja grijača, mjerenje temperature se mora provoditi mjerenjem promjene otpora grijača neuravnoteženim Wheatstoneovim mostom.



Slika 23. Primjer promjene otpora vruće ploče s vremenom tijekom jednog mjerenja

Eksperimentalno izmjerene vrijednosti temperature s vremenom su obrađene metodama nelinearne regresije u računalnom programu Matlab. Na bloku ekspaniranog polistirena su napravljena mjerenja pri različitim naponima vruće ploče pomoću kojih se baždariла aparatura.

Primjer mjerenja toplinskih svojstava na ekspandiranom polistirenu pri naponu vruće ploče od 3V prikazan je na slici 24.

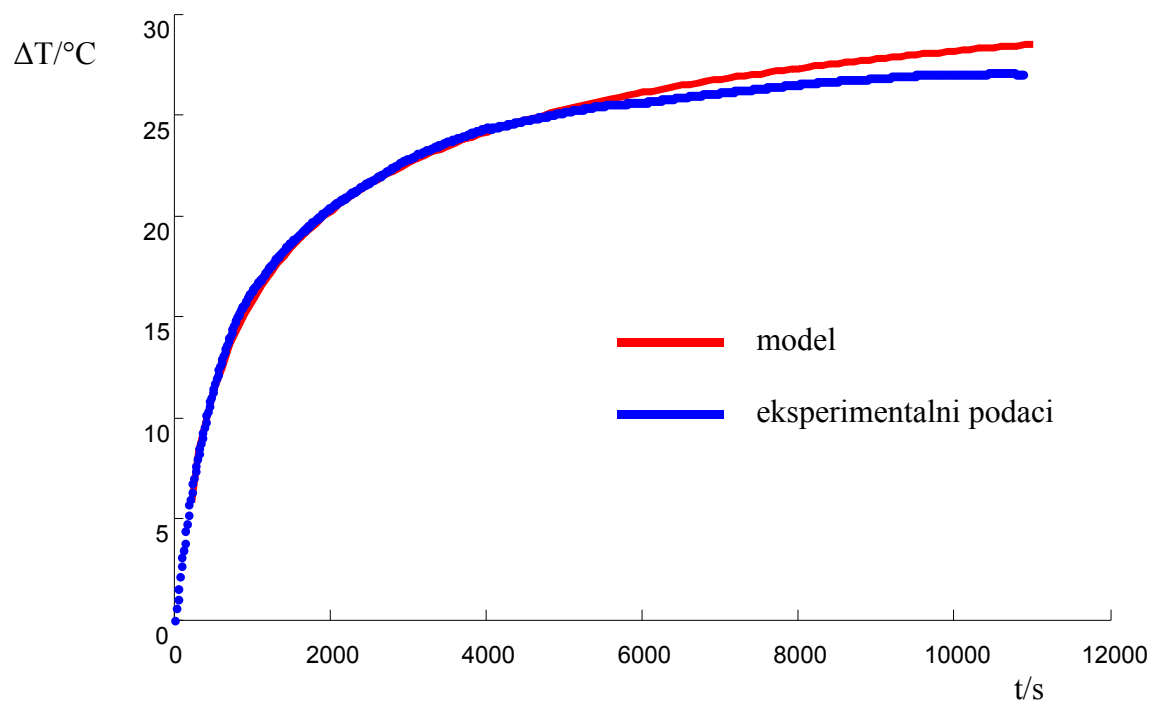


Slika 24. Usporedba eksperimentalnih podataka dobivenih mjerenjima na ekspandiranom polistirenu pri naponu od 3V s modelom Gustaffsonove metode

Plavom linijom su označeni eksperimentalni podaci dok su crvenom linijom označeni podaci izračunati pomoću modela.

Pri naponu od 3V, procijenjena toplinska difuzivnost ekspandiranog polistirena je $1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, a snaga grijača 0,25W.

Primjer mjerenja toplinskih svojstava na ekspandiranom polistirenu pri naponu od 4,5V prikazan je na slici 25.



Slika 25. Usporedba eksperimentalnih podataka dobivenih mjerenjima na ekspandiranom polistirenu pri naponu od 4,5V s modelom Gustaffsonove metode

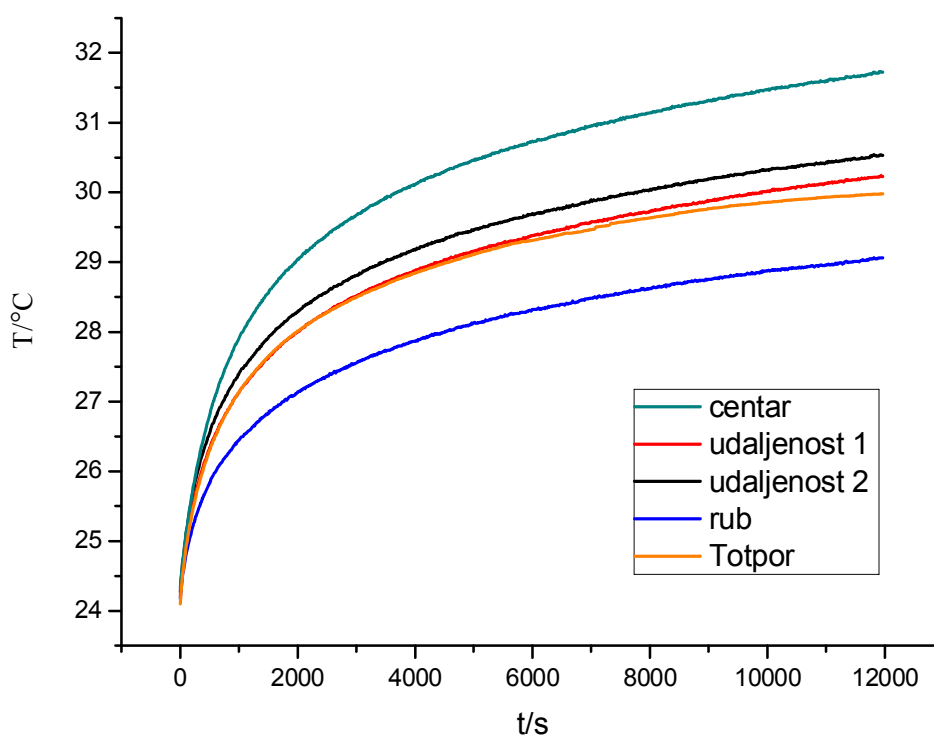
Pri naponu od 4,5V i toplinskoj difuzivnosti ekspandiranog polistirena od $1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, procijenjena snaga grijača je 0,69W.

Nakon procjene snage grijača mjerenjem toplinske vodljivosti referentnog materijala, napravljena su mjerenja na balama slame.

4.1.2. Mjerenja na balama slame

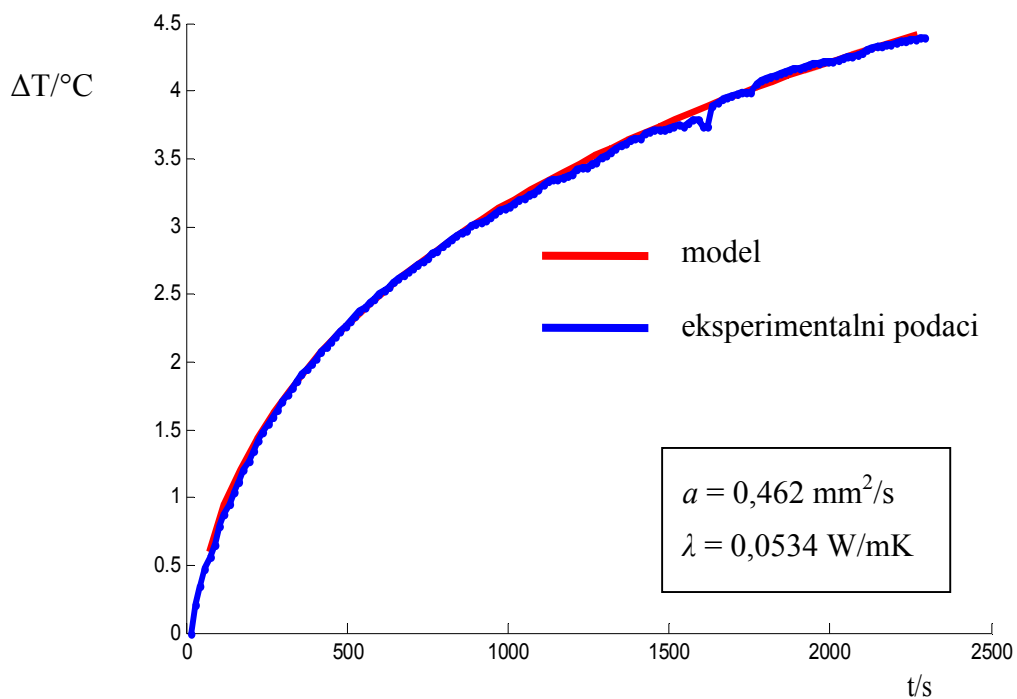
Mjerenja na balama slame izvedena su na isti način kao i mjerenja na referentnom materijalu.

Primjer prikupljenih podataka tijekom jednog mjerenja na blama slame pri naponu od 3V prikazan je na slici 26.

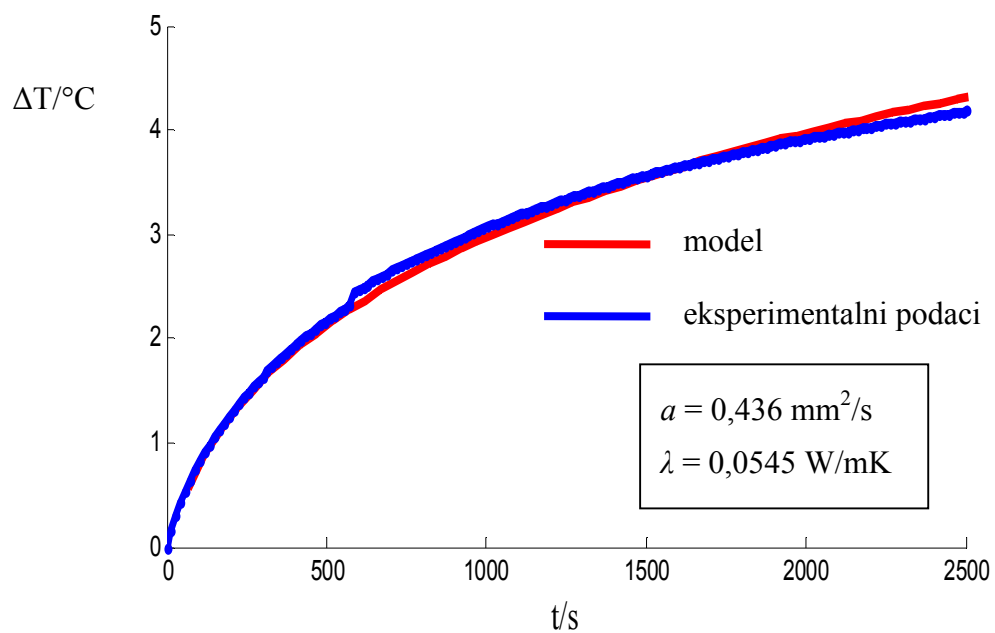


Slika 26. Promjena temperature pojedinih dijelova grijača s vremenom tijekom mjerenja na balama slame

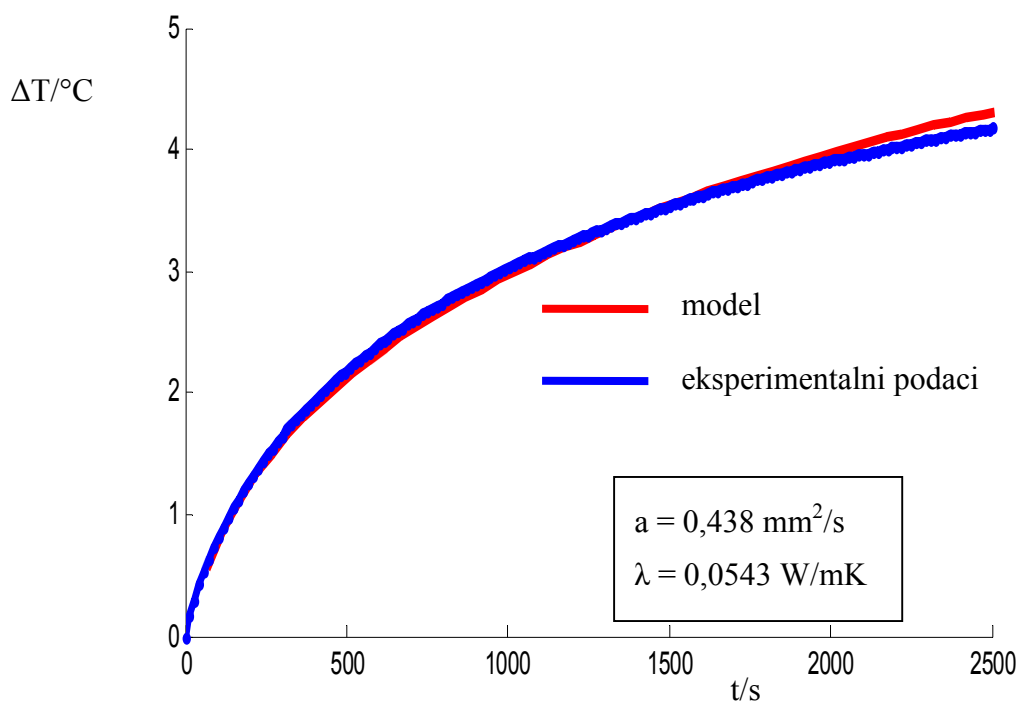
Obradom eksperimentalnih podataka u računalnom programu Matlab, dobiveni su sljedeći rezultati:



Slika 27. Rezultati prvog mjerenja toplinskih svojstava bala slame pri naponu od 3V



Slika 28. Rezultati drugog mjerenja toplinskih svojstava bala slame pri naponu od 3V



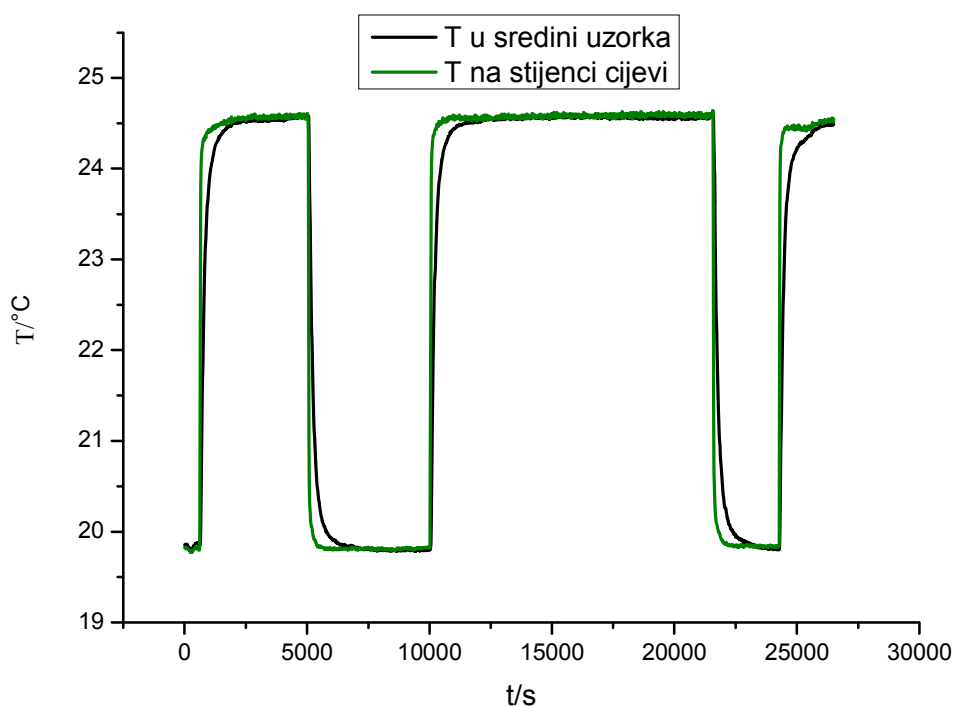
Slika 29. Rezultati trećeg mjerenja toplinskih svojstava bala slame pri naponu od 3V

Vrijednosti procijenjene toplinske difuzivnosti se kreću između 0,436 i 0,462 mm^2/s dok se vrijednosti procijenjene toplinske vodljivosti kreću između 0,0534 i 0,0545 W/mK .

4.2. Određivanje toplinske difuzivnosti izlaganjem materijala skokovitoj promjeni temperature

Toplinska difuzivnost slame ispitana je na pripremljenim uzorcima gustoće 48 kg/m^3 koji su duže vrijeme bili čuvani u prostorima relativne vlažnosti zraka 44 i 60%.

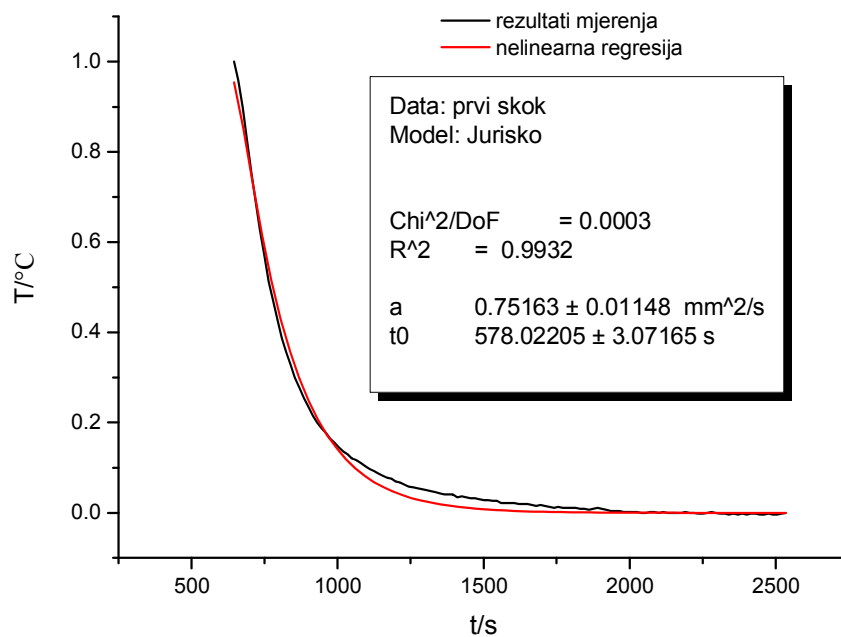
Rezultati dobiveni mjerenjima na uzorku čuvanom na zraku relativne vlažnosti 44% prikazani su na slici (30).



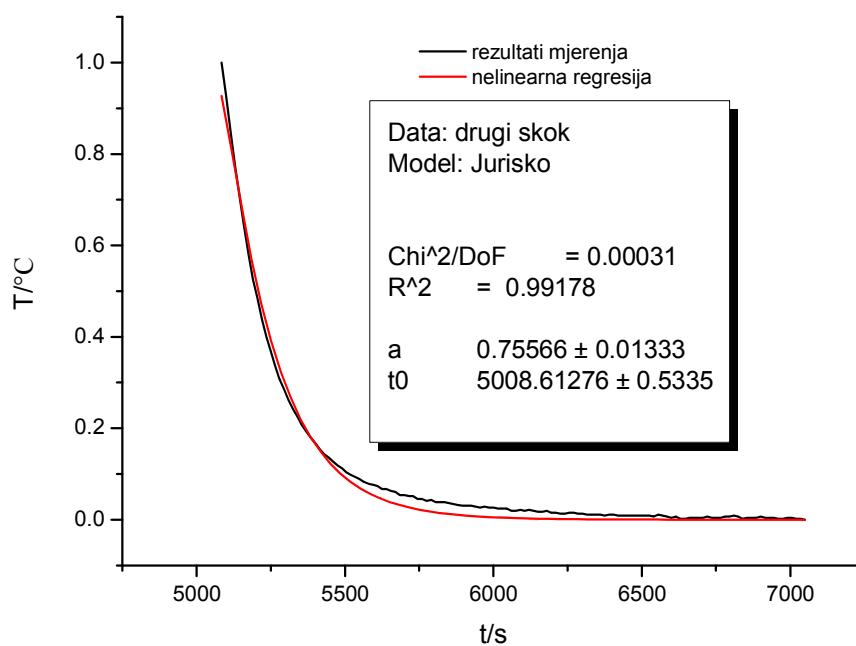
Slika 30. Prikaz skokovite promjene temperature uzorka i stijenske cijevi

Iz eksperimentalnih podataka je prema jednadžbi (15) izračunata bezdimenzijska temperatura (θ) koja je metodama nelinearne regresije uspoređena s bezdimenzijskom temperaturom izračunatom prema modelu procesa (jednadžba (17)).

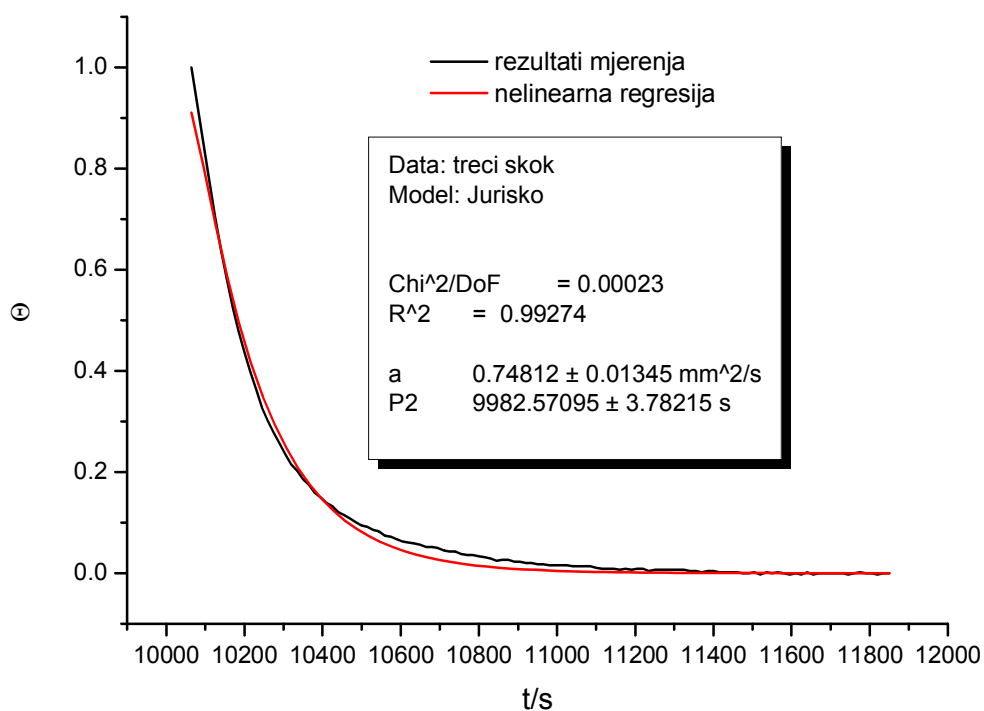
Toplinska difuzivnost materijala je procijenjena analizirajući tri skokovite promjene temperature.



Slika 31. Analiza toplinske difuzivnosti uzorka pri prvoj skokovitoj promjeni temperature



Slika 32. Analiza toplinske difuzivnosti uzorka pri drugoj skokovitoj promjeni temperature

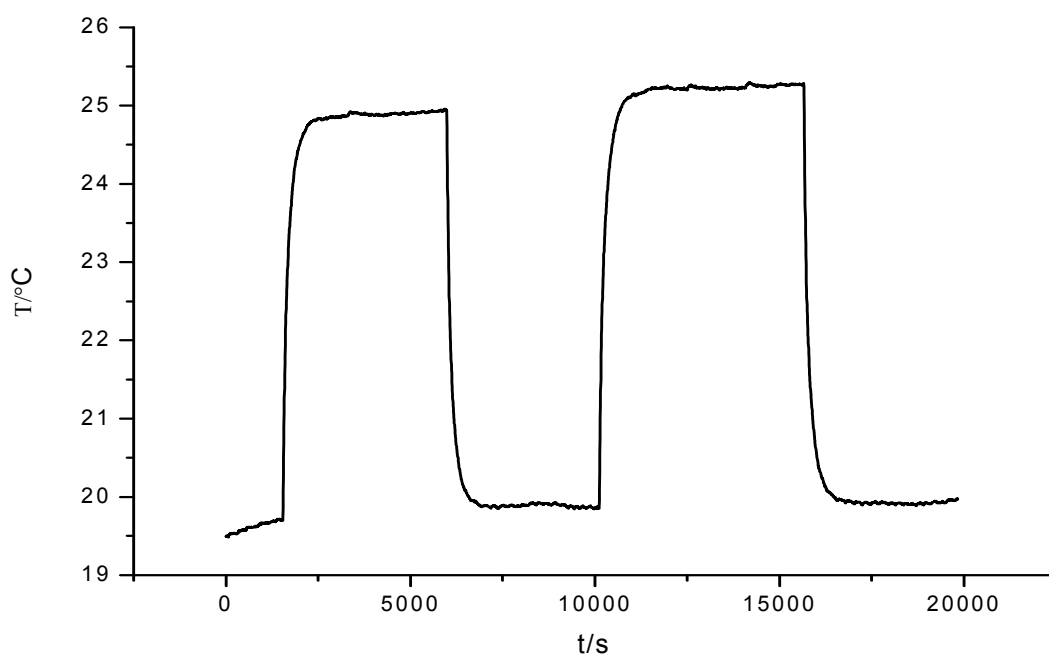


Slika 33. Analiza toplinske difuzivnosti uzorka pri trećoj skokovitoj promjeni temperature

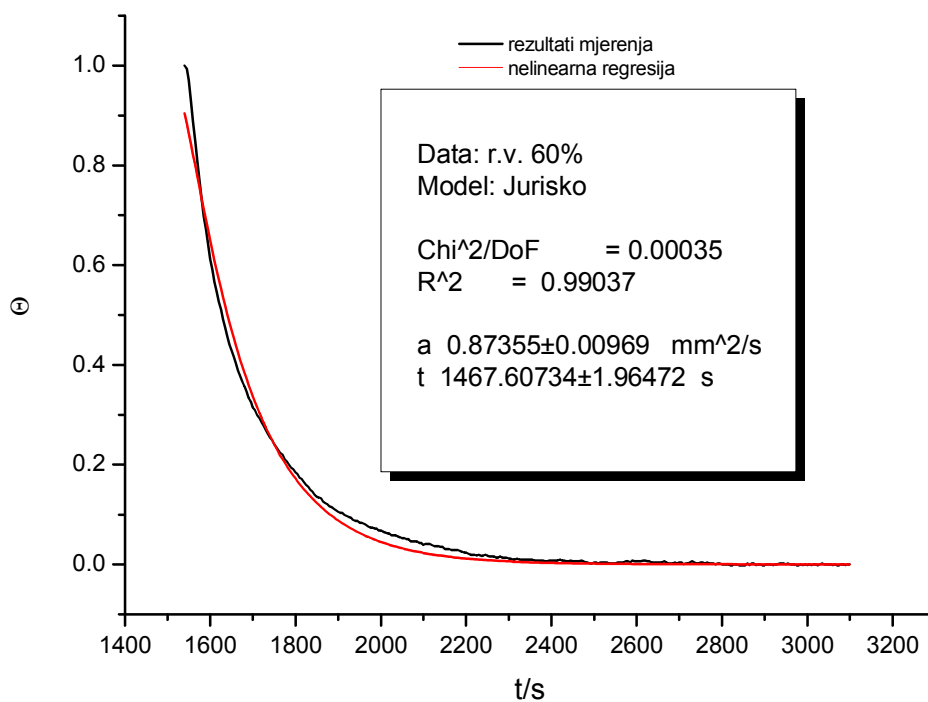
Na prikazanim slikama su crnim linijama prikazani rezultati mjerenja. Crvenim linijama su prikazani rezultati dobiveni nelinearnom regresijskom analizom izmjerenih podataka i podataka izračunatih iz modela procesa. Procijenjena toplinska difuzivnost uzorka navedena je na svakoj slici.

Prividna toplinska difuzivnost uzorka čuvanog na zraku relativne vlažnosti zraka 44% određena ovom metodom iznosi između 0,75 i 0,76 mm²/s.

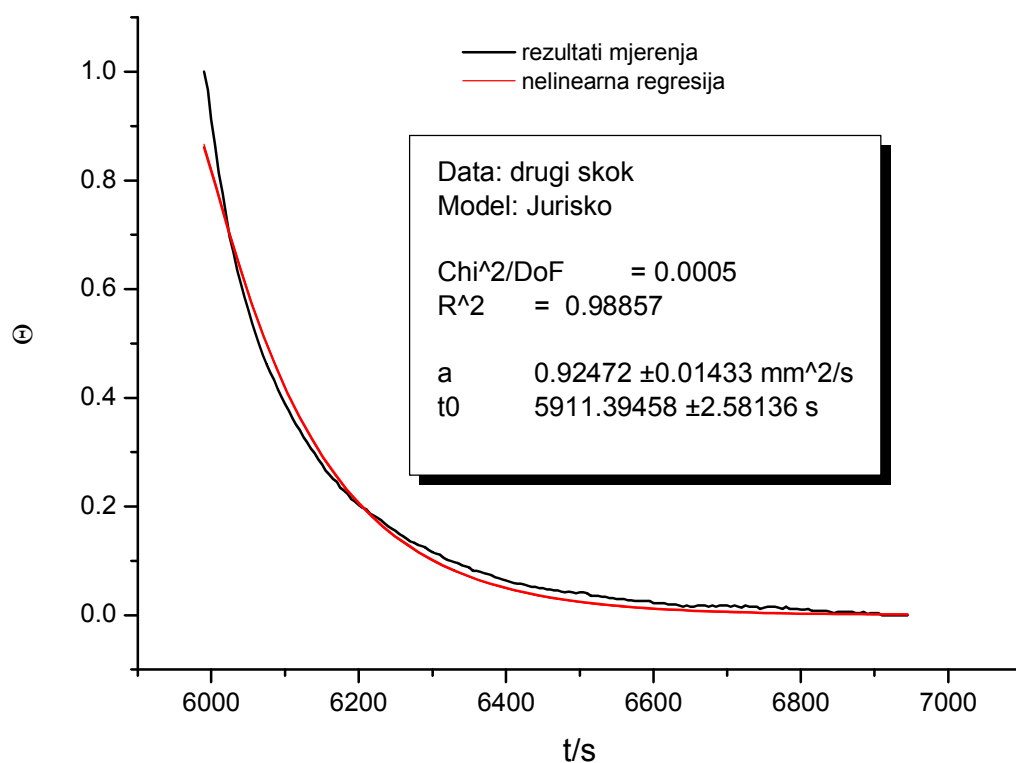
Rezultati dobiveni mjerenjima na uzorku čuvanom na zraku relativne vlažnosti 60% prikazani su na slici 34.



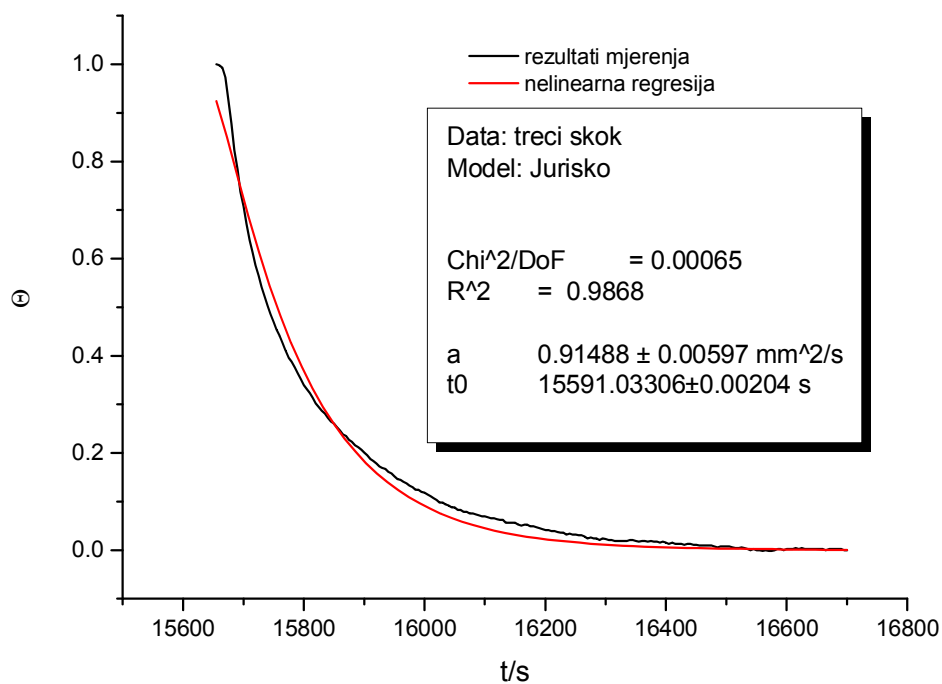
Slika 34. Prikaz skokovite promjene temperature uzorka



Slika 35. Analiza toplinske difuzivnosti uzorka pri prvoj skokovitoj promjeni temperature



Slika 36. Analiza toplinske difuzivnosti uzorka pri drugoj skokovitoj promjeni temperature



Slika 37. Analiza toplinske difuzivnosti uzorka pri trećoj skokovitoj promjeni temperature

Na prikazanim slikama su crnim linijama prikazani rezultati mjerenja. Crvenim linijama su prikazani rezultati dobiveni nelinearnom regresijskom analizom izmjerenih podataka i podataka izračunatih iz modela procesa. Procijenjena toplinska difuzivnost uzorka (α) navedena je na svakoj slici.

Prividna toplinska difuzivnost uzorka čuvanog na zraku relativne vlažnosti zraka 60% određena ovom metodom iznosi između 0,87 i 0,93 mm²s⁻¹.

5. RASPRAVA

5.1. Određivanje toplinske vodljivosti Gustaffsonovom metodom vruće ploče

Slama se još uvijek rijetko koristi kao građevni materijal unatoč svim svojim prednostima. Zbog rijetke primjene, teško je pronaći podatke o primjenjivim metodama mjerenja toplinskih svojstava kao i rezultate tih mjerenja u znanstvenoj i tehničkoj literaturi. Balirana slama je heterogeni materijal velikih dimenzija pa je zbog toga teško pronaći pogodnu metodu određivanja toplinskih svojstava.

Za određivanje toplinske vodljivosti odabrana je dinamička Gustaffsonova metoda vruće ploče. U računalnom programu Matlab je raspisan relativno kompleksni Gustaffsonov model vruće ploče (vidi jednadžbe (10 i 11)) koji je priložen u prilogu. Prednosti ove metode pri ispitivanju standardnih uzoraka su kratko vrijeme ispitivanja te izvodljivost mjerenja u realnim uvjetima. Budući da je bala slame heterogena i puno većih dimenzija od uzoraka koji se uobičajeno ispituju ovom metodom, bilo je potrebno napraviti uvećanja (scale-up) vruće ploče. Vruća ploča korištena u ovom radu je desetak puta veće linearne dimenzije od najčešće korištenih ploča pa je zbog toga i vrijeme ispitivanja puno duže.

Za validaciju metode napravljena su mjerenja na ekspaniranom polistirenu kojemu je poznata toplinska vodljivost. Na **slici 22** dan je primjer prikupljenih podataka tijekom mjerenja. Iz slike se može zaključiti kako se centar vruće ploče najviše zagrijao u zadanome vremenu, a rubni dio vruće ploče najmanje. Zbog nejednolikog zagrijavanja grijača, mjerenje srednje temperature se provodi mjerenjem promjene otpora grijača neuravnoteženim Wheatstoneovim mostom. Izračunata promjena otpora grijača s vremenom prikazana je na **slici 23**. Na ovim se slikama može vidjeti da krivulja koja prikazuje promjenu otpora vruće ploče s vremenom dobro prati oblike krivulja dobivenih mjerenjem odziva termoparova. Pomoću jednadžbi (12) i (13) izračunata je promjena temperature grijača s vremenom. Izračunata promjena temperature predstavlja usrednjenu vrijednost promjene temperature vruće ploče što je prikazano na **slici 22** narančastom linijom. Dakle, vidi se da korištena

literaturna vrijednost temperaturnog koeficijenta za bakar odgovara "srednjoj" vrijednosti temperatura izmjerenih pomoću termoparova.

Na **slikama 24 i 25** prikazani su primjeri usporedbe eksperimentalnih podataka dobivenih mjerenjima na ekspaniranom polistirenu pri naponima vruće ploče od 3 i 4,5 V s modelom Gustaffsonove metode. Uz poznatu toplinsku vodljivost, procijenjena je toplinska difuzivnost i napravljena je korekcija snage grijača. Korekcija snage grijača je napravljena zbog gubitaka topline i velike mase grijača koja akumulira dio topline koja iznosi oko 9%. Ovim postupkom je baždarena metoda.

Na slikama se može vidjeti odstupanje od idealnog modela na početku i na kraju mjerenja. Na samom početku mjerenja dolazi do odstupanja zbog utjecaja neidealnosti grijača, toplinskog kapaciteta i mase ploče. Kako vrijeme mjerenja odmiče, tako sve više do izražaja dolazi utjecaj okoline zbog konačnih dimenzija uzorka (slika 13). Prilikom obrade podataka, bitno je odabrati reprezentativno područje u kojemu nema utjecaja spomenutih sustavnih odstupanja.

Na **slikama (27 - 29)** prikazani su rezultati mjerenja toplinskih svojstava bala slame pri naponu od 3V. Rezultati mjerenja su uspoređivani s Gustaffsonovim modelom vruće ploče. Na svakoj slici je označena procijenjena toplinska vodljivost i toplinska difuzivnost.

U općem dijelu ovog rada je navedeno da se toplinska vodljivost slame smanjuje s porastom gustoće te pri određenoj gustoći postiže minimum (slika 6). Daljnjim porastom gustoće, toplinska vodljivost će prvo stagnirati na minimalnoj vrijednosti, a zatim će se povećavati. Pri nižim gustoćama bala slame dolazi do kombiniranog prijenosa topline mehanizmom kondukcije i konvekcije. Što je manja gustoća slame, to će se sve više pojačavati utjecaj mehanizma konvekcije na prijenos topline. S obzirom da su mjerenja provedena na balama slame niske gustoće, očekivane su više vrijednosti toplinske vodljivosti i toplinske difuzivnosti od onih navedenih u **tablici 2** koja se nalazi u općem dijelu rada.

Kao što je navedeno u rezultatima mjerenja, vrijednosti procijenjene toplinske difuzivnosti balirane slame se kreću između 0,436 i 0,462 mm²/s dok se vrijednosti toplinske vodljivosti

kreću između 0,0534 i 0,0545 W/mK. S obzirom da je ispitivani uzorak male gustoće (67 kg/m^3), dobivene vrijednosti toplinske vodljivosti i toplinske difuzivnosti bala slame su više od literaturnih što se može objasniti nižim gustoćama ispitivanih uzoraka u odnosu na literaturne vrijednosti.

Tablica 4. Toplinska svojstva bala pšenične slame pri različitim gustoćama

	Gustoća, kgm^{-3}	c_p, $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$	$c_{p/v}$, $\text{Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$	Toplinska vodljivost, $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$	Toplinska difuzivnost, mm^2s^{-1}
Eksperimentalno određeni podaci	67	2000	134000	0,0534 -0,0545	0,436 -0,462
Literaturni podaci	82	2000	164000	0,0486	0,30
Literaturni podaci	95	2000	190000	0,0482	0,25
Literaturni podaci	113	2000	226000	0,0416	0,18
Literaturni podaci	125	2000	251000	0,0414	0,16
Literaturni podaci	138	2000	276000	0,0416	0,15

U tablici 4 su podebljani rezultati dobiveni određivanjem toplinskih svojstava u sklopu ovog rada.

5.2. Određivanje toplinske difuzivnosti izlaganjem materijala skokovitoj promjeni temperature

U ovom radu je dodatno određivana toplinska difuzivnost izlaganjem materijala skokovitoj promjeni temperature. Mjerenja su obavljena na uzorcima koji su se čuvali u prostorijama različite relativne vlažnosti zraka (44 i 60%).

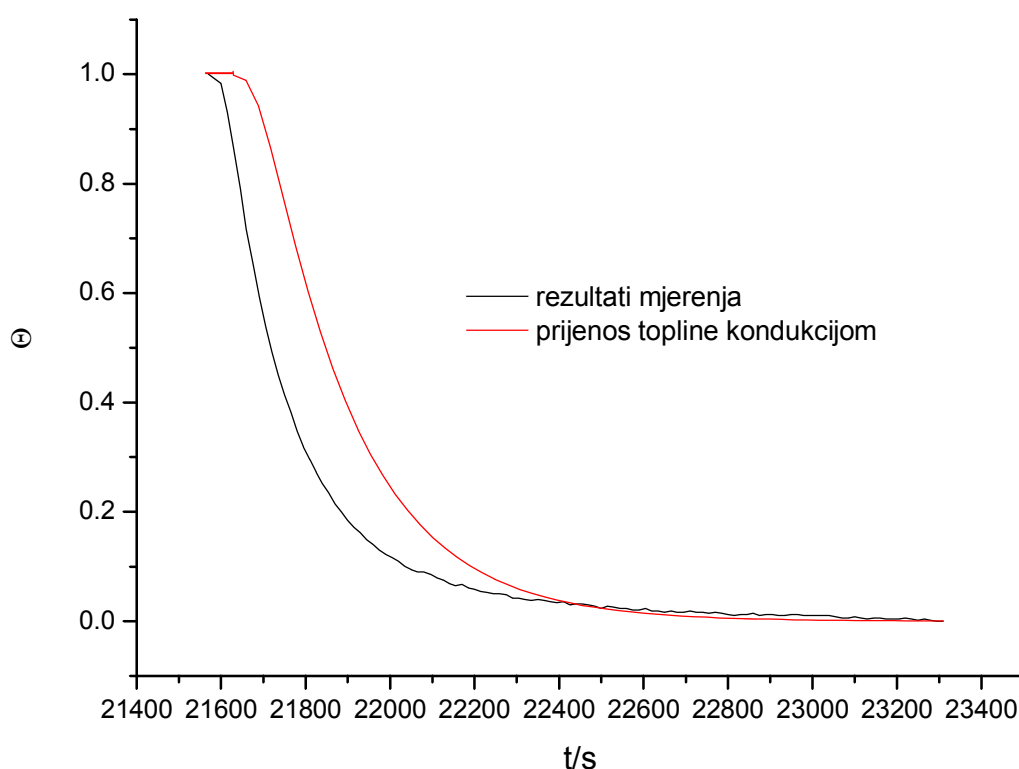
Na **slici 30** prikazane su skokovite promjene temperature uzorka i stijenke cijevi. Dobiveni rezultati su uspoređeni s modelom u računalnom programu OriginLab. Na uzorku čuvanom na manjoj vlažnosti, izmjerena je toplinska difuzivnost između 0,75 i 0,76 mm²/s što je prikazano na **slikama (31-33)**.

Na većoj je vlažnosti izmjerena toplinska difuzivnost između 0,87 i 0,93 mm²/s što je prikazano na **slikama (35 - 37)**. Iz tih podataka se može zaključiti da se toplinska difuzivnost materijala povećava sa sadržajem vlage u samom uzorku.

Izmjerena toplinska difuzivnost uzoraka je puno viša nego što se moglo očekivati usporedbom s literaturnim podacima. Razlog tome je vrlo mala gustoća uzorka odnosno velika poroznost uzorka. Šupljine u uzorku omogućuju da se prijenos topline odvija mehanizmom kondukcije i konvekcije. Kombinacijom mehanizama prijenosa topline kondukcije i konvekcije dolazi do bržeg prijenosa topline kroz uzorak.

Za procjenu toplinske difuzivnosti korišten je model u kojemu je sadržana pretpostavka da se toplina prenosi samo mehanizmom kondukcije. Takav model ne može dobro opisati stvaran prijenos topline kroz uzorak.

Razliku između izračunatih podataka pomoću modela i eksperimentalnih podataka prije provođenja nelinearne regresije najbolje se može vidjeti na slici 38.



Slika 38. Utjecaj konvekcije na promjenu temperature

Na slici su crnom linijom označeni rezultati mjerenja, a crvenom linijom je prikazana promjena temperature s vremenom uz pretpostavku prijenosa topline samo mehanizmom kondukcije. Na slici se može vidjeti da je izmjerena brža promjena temperature s vremenom što znači da je osjetan utjecaj konvekcije. Utjecaj konvekcije je veći na početku mjerenja zbog veće razlike u temperaturama uzorka i kupelji. Kako razlika temperatura pada, tako se smanjuje utjecaj konvekcije. Na slici se može vidjeti da kod prijenosa topline mehanizmom kondukcije postoji vremenska zadržka odnosno da se početna temperatura počinje mijenjati tek nakon nekog vremena. Iz rezultata mjerenja se može vidjeti da se temperatura u uzorku trenutačno počinje mijenjati zbog velikog doprinosa mehanizma konvekcije.

6. ZAKLJUČAK

Slama je poljoprivredni nusproizvod koji se zbog svojih prednosti sve češće koristi kao građevni materijal. Glavne prednosti ovog ekološkog materijala su niska cijena, odlična toplinska i zvučna izolacija te vatrootpornost. U radu je ukratko opisano na koje se sve načine može koristiti slama kao građevni materijal.

Za određivanje toplinske vodljivosti balirane slame odabrana je Gustaffsonova metoda vruće ploče. Materijali koji imaju veliku toplinsku vodljivost će odvoditi više topline s grijača pa će na njemu porast temperature biti sporiji. Mjerenjem temperature vruće ploče moguće je odrediti toplinsku vodljivost materijala. Metoda je validirana i baždarena mjerenjima na referentnom materijalu poznate toplinske vodljivosti. Za obradu podataka napravljen je program u računalnom paketu Matlab. Dobivene eksperimentalne vrijednosti toplinske vodljivosti i toplinske difuzivnosti su nešto veće od dostupnih literaturnih podataka. Ova odstupanja su u skladu s različitim gustoćama uspoređivanih uzoraka. Veću toplinsku vodljivost pri manjoj gustoći bale slame objašnjavamo većim doprinosom konvekcije na ukupni prijenos topline.

Za određivanje toplinske difuzivnosti odabrana je metoda izlaganja uzorka skokovitim promjenama temperature. Iz dobivenih rezultata se može zaključiti da se prijenos topline kroz uzorak odvijao mehanizmom kondukcije i konvekcije. S obzirom da je korišten model u kojemu je sadržana pretpostavka o prijenosu topline samo mehanizmom kondukcije, nije moguće precizno odrediti toplinsku difuzivnost.

7. POPIS OZNAKA

c_p = specifični toplinski kapacitet, $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$

$c_{p/v}$ = volumni specifični toplinski kapacitet $\text{Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$

Q = toplina, J

m = masa, kg

T = temperatura, K

a = toplinska difuzivnost, $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$

λ = toplinska vodljivost, $\text{Wm}^{-1} \text{K}^{-1}$

ρ = gustoća, kgm^{-3}

R = otpor, Ω

α = temperaturni koeficijent otpora, K^{-1}

A = poprečni presjek, m^2

x = debljina, m

t = vrijeme, s

R = promjer, mm

w = debljina uzorka, mm

P = snaga vruće ploče, W

$D(\tau)$ = bezdimenzijsko vrijeme

Θ = bezdimenzijska temperatura

r_M = radijalni položaj temperaturnog osjetila, mm

J_i = Besselova funkcija prve vrste i -tog reda

ζ_n = vrijednosti pozitivnih nultochki karakteristične jednačbe

q_v = volumetrijska generacija topline, Wm^{-3}

8. LITERATURA

1. Jones. B., Priručnik za gradnju kuća od bala slame, DataArt+ Studio, Mursko Središće, 2006.
2. Glasnović Z., Horvat J., Omahać D.; Slama kao superiorni građevinski materijal, Tehnoeko, svibanj 2008.
<http://www.fkit.hr/files/mediji/Tehnoeko%20-%20Slama.pdf>
3. Straw-bale construction: Encyclopedia II - Straw-bale construction – History
http://www.experiencefestival.com/a/Straw-bale_construction_-_History/id/2095235
4. Ashour T., The use of renewable agricultural by-Products as building materials, Ph. D Thesis, Faculty of agriculture, Moshtohor, 2003.
5. Ukrainczyk N., Razvoj modela procesa hidratacije cementa, Disertacija, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Sveučilište u Zagrebu, 2009.
6. Ukrainczyk N., Interna skripta za vježbe iz kolegija Građevni materijali, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Sveučilište u Zagrebu, 2010.
7. He Y, Rapid thermal conductivity measurement with a hot disk sensor: Part 1. Theoretical considerations, Thermochimica Acta, Volume 436, Issues 1-2, 1 October 2005, 122-129
8. Ukrainczyk N., Određivanje toplinskih svojstava građevnih materijala, Predavanje, Zagrebački energetska tjedan, 2010.

9. Ukrainczyk N., Matusinović T., Thermal Properties of Hydrating Calcium Aluminate Cement Pastes, *Cement and Concrete Research*, 40 (2010) 128 -136.
[doi:10.1016/j.cemconres.2009.09.005](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.09.005)
10. Ukrainczyk N., Thermal Diffusivity Estimation Using Numerical Inverse Solution for 1D Heat Conduction, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52 (2009) 5675-5681.
[doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.07.029](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.07.029)
11. Perry J.H., *Chemical Engineers' Handbook*, 4th ed., Toronto, 1950.
12. Carslaw H. S., Jaeger J. C., *Conduction of Heat In Solids*, Second Edition, Oxford University Press, Oxford, 1959.
13. Alešković J., *Dinamičko mjerenje toplinske vodljivosti metodom vruće žice*, diplomski rad, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Sveučilište u Zagrebu, 2007.
14. German national organisation of straw bale building (fasba)
<http://www.fasba.de/>
15. Ortech Industries
<http://www.ortech.com.au>
16. Glasnović A., *Interna skripta iz kolegija Prijenos tvari i energije*, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, 2007.

9. PRILOG

Računalni kod za procjenu toplinske difuzivnosti materijala napravljen u računalnom programu MATLAB:

```
clear all
close all
m = 40; % ('broj koncentricnih krugova')
a = 4.62e-7; % ('Thermal diffusivity') m2/s
P = 0.25; % ('power output [W]')
r = 0.0635; % ('radius najveceg kruga') m
lambda = 0.0534; %W/mK

t0 = 40;
T0 = 0;
T0_model = 0;
t = 10:40:2500;

sigma=sqrt(a*t)/r;
sigma2=a*t/r^2;

for tau = 1:length(t)
    for k = 1 : m
        for lj = 1 : m
            M(k,lj)=k*lj*exp(-(k^2 +
            lj^2)/(m^2*4*sigma2(tau)))*besseli(0,k*lj/(2*m^2*(sigma2(tau))));
        end
    end
    pod(tau)= sum(sum(M))/(sigma2(tau));
end

for i=2:length(sigma)
    D(i-1)=trapz(sigma(1:i), pod(1:i));
end
D = D/(m^2*(m+1)^2);
T = P*D/((pi*sqrt(pi))*r*lambda);

figure(1)
%ovisnost sigma-D(sigma)
plot(sigma(1:end-1), D);

figure(2)
%ovisnost sigma-T(sigma)
plot(sigma(1:end-1), T);

figure(3)
%nagib: D(sigma)-T(sigma)
plot(D,T);

figure(4)
% ovisnost: T=f(t)
plot(t(1:end-1), T
```

ŽIVOTOPIS

OSOBNİ PODACI

Ime i prezime:	Ivan Juriško
Datum i mjesto rođenja:	03.02.1986., Zagreb
Adresa prebivališta:	Svetojakobska 1, 10040 Zagreb
Telefon:	098/ 685-700
E-mail:	ijurisko@fkit.hr

OBRAZOVANJE

2000.-2004.	III. gimnazija, Zagreb (opća gimnazija)
2004.-2008.	Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Preddiplomski studij, smjer: Kemijsko inženjerstvo
2008.-2010.	Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Diplomski studij, smjer: Kemijsko procesno inženjerstvo

ZNANSTVENI RADOVI

"Metode kontrole materijala bez razaranja"	Završni rad preddiplomskog studija
"Vođenje laboratorijskog procesa izmjene topline primjenom naprednih metoda vođenja"	Rad prezentiran na natjecanju znanstvenih radova "Tehnologijada" 2009. godine i na znanstvenom kolokviju "AMACIZ" (Društvo diplomiranih inženjera i prijatelja Kemijsko-tehnološkog studija)