

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Marko LUŠIN

**VPLIV VLAŽNOSTI NA TOPLOTNO PREVODNOST
OPAŽNIH PLOŠČ**

DIPLOMSKI PROJEKT

Visokošolski strokovni študij - 1. stopnja

Ljubljana, 2013

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Marko LUŠIN

**VPLIV VLAŽNOSTI NA TOPLOTNO PREVODNOST OPAŽNIH
PLOŠČ**

DIPLOMSKI PROJEKT
Visokošolski strokovni študij - 1. stopnja

**IMPACT OF MOISTURE CONTENT ON THERMAL
CONDUCTIVITY OF CONSTRUCTION BOARDS**

B. SC. THESIS
Professional Study Programmes

Ljubljana, 2013

Diplomski projekt je zaključek Visokošolskega strokovnega študija Tehnologije lesa in vlaknatih kompozitov – 1. stopnja. Delo je bilo opravljeno na Katedri za tehnologijo lesa, Oddelka za lesarstvo, Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani.

Senat Oddelka za lesarstvo je za mentorja diplomskega dela imenoval izr. prof. dr. Željka Goriška in za recenzenta doc. dr. Aleša Stražeta.

Mentor: izr. prof. dr. Željko Gorišek

Recenzent: doc. dr. Aleš Straže

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik:

Član:

Član:

Datum zagovora:

Diplomski projekt je rezultat lastnega dela. Podpisani se strinjam z objavo svojega diplomskega projekta na spletni strani Digitalne knjižnice Biotehniške fakultete. Izjavljam, da je projekt, ki sem ga oddal v elektronski obliki, identičen tiskani verziji.

Marko Lušin

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD	Dv1
DK	630*812.141:862
KG	les/opažne plošče/toplotna prevodnost/termična difuzivnost/vlažnost/gostota
AV	LUŠIN, Marko
SA	GORIŠEK, Željko (mentor) / STRAŽE, Aleš (recenzent)
KZ	SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina C. CIII/34
ZA	Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo
LI	2013
IN	VPLIV VLAŽNOSTI NA TOPLOTNO PREVODNOST OPAŽNIH PLOŠČ Diplomski projekt (Visokošolski strokovni študij - 1. stopnja)
OP	IV, 31 str., 5 pregl., 17 sl., 9 vir
IJ	sl
JJ	sl/en
AI	Opažne plošče imajo poleg svoje osnovne funkcije lahko tudi vlogo toplotnega izolatorja. Proučevali smo vpliv vlažnosti, gostote in premaznega sistema na hitrost segrevanja, termično difuzivnost in toplotno prevodnost standardnih smrekovih opažnih plošč debeline 26 mm. Variabilnost proučevanih parametrov je bila zelo velika, zato značilnih statističnih razlik in vplivov nismo uspeli potrditi, povprečne vrednosti pa nakazujejo, da je toplotna izolativnost plošč brez premazov izolacijsko ugodnejša od plošč z malaminskim premazom, z višanjem gostote se toplotna prevodnost nekoliko povečuje, slabšo izolativnost pa izkazujejo tudi plošče z višjo vlažnostjo.

KEY WORDS DOCUMENTATION

ND Dv1
DC 630*812.141:862
CX wood/playwood/thermal conductivity/ thermal diffusivity /moisture content /density
AU LUŠIN Marko
AA GORIŠEK Željlo supervisor / STRAŽE Aleš co-advisor
PP SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina C. CIII/34
PB University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science and Technology
PY 2013
TY IMPACT OF MOISTURE CONTENT ON THERMAL CONDUCTIVITY OF PLYWOOD BOARDS
DT B. Sc. Thesis (Professional Study Programme)
NO IV, 31 p., 5 tab., 17 fig., 13 ref. .
LA sl
Al sl/en
AB In addition to their basic function plywood boards can be used also as a heat insulator . We studied the effect of moisture, density and coating system on the rate of heating, on the thermal diffusivity and on the thermal conductivity. Plywood boards were constructed from three layers of spruce wood with total thickness of 26 mm. Variability of the examined parameters was very large therefore we were not able to confirm the statistical differences. In average the plywood board without coating had slightly better thermal insulation than boards whit melamine coating. With higher density thermal conductivity slightly increases by Boards with melamine coating exhibited somewhat dependency from density and moisture content.

KAZALO VSEBINE

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA	II
KEY WORDS DOCUMENTATION	III
KAZALO VSEBINE	IV
KAZALO PREGLEDNIC	V
KAZALO SLIK	VI
1 UVOD	1
1.1 OPREDELITEV PROBLEMA	1
1.2 DELOVNE HIPOTEZE	1
1.3 CILJI RAZISKAVE	2
2 PREGLED LITERATURE	3
2.1 TOPLOTNE LASTNOSTI LESA	3
2.1.1 Toplotne dilatacije lesa	3
2.1.2 Specifična toplota lesa	4
2.2 PRENOS TOPLOTE	5
2.2.1 Toplotna prevodnost (kondukcija)	5
2.2.2 Toplotna prestopnost (konvekcija)	9
2.2.3 Sevanje (radiacija)	10
2.3 TOPLOTNA IZOLATIVNOST	10
2.3.1 Najbolj pogosto uporabljeni materiali	10
2.3.2 Lesni kompoziti namenjeni toplotni izolaciji	11
3 MATERIALI IN METODE	12
3.1 MATERIAL	12
3.2 METODE	13
3.2.1 Merjenje temperaturnega gradienta	13
3.2.2 Zajem podatkov in izračun toplotnih karakteristik	14
4 REZULTATI	18
4.1 RAVNOVESNA VLAŽNOST IN GOSTOTA PREIZKUŠANCEV	18
4.2 HITROST SEGREVANJA OPAŽNIH PLOŠČ	18
4.3 POLOVIČNI ČAS SEGREVANJA	20
4.4 TOPLOTNA PREVODNOST IN TERMIČNA DIFUZIVNOST PLOŠČ	21
5 RAZPRAVA IN SKLEPI	23
5.1 RAZPRAVA	23
5.2 SKLEPI	25
6 POVZETEK	26
7 VIRI	27
8 ZAHVALA	28

1 UVOD

1.1 OPREDELITEV PROBLEMA

Les je že tisočletja najbolj priljubljen in uporabljen material, z odličnimi lastnosti za raznovrstno uporabo. Dopušča različne načine obdelave in predelave ter različne konstrukcijske rešitve. Poleg tega je les biološki in obnovljiv material z blagodejnim učinkom na okolje in prijetnim videzom ter toplim dotikom. Raba lesa je zelo široka, pri tem pa skušamo izkoristiti vse njegove pozitivne lastnosti.

Les je organska snov in ima zato nekatere značilnosti, ki jih pri drugih materialih ne zasledimo, kot so (Geršak, Velušček, 2003)

- nehomogenost in raznolikost,
- poroznost,
- higroskopnost (sposobnost sprejemanja in oddajanja vlage iz zraka),
- anizotropnost (v različnih smereh različne lastnosti) in
- velika variabilnost zgradbe, vlažnosti, gostote, trdnosti in drugih lastnosti.

V današnjih časih vse več zasledimo povečano vgradnjo lesa v različne gradbene objekte. Vse pogosteje se les in lesne plošče pojavljajo kot primerna toplotna izolacija tako stanovanjskih kot tudi poslovnih objektov. Težava se pojavi zaradi nihajoče temperature in vlažnosti ozračja, ki ob spremembi vlažnosti lesa vpliva na njegovo neugodno delovanje, hkrati pa se spreminjajo tudi druge fizikalno-mehanske lastnosti (Gorišek in sod. 1994).

Kot izolacijski materiali objektov se najpogostejše uporabljajo: ekspandiran polistiren, steklena volna, v zadnjem času pa se ponovno uveljavlja tudi les in lesni kompoziti. Uporabljamo lahko masiven les (macesen, hrast,...), ki ima tudi estetske funkcije, lahko pa uporabljamo tudi lesna tvoriva (opažne plošče, furnirske plošče, iverne plošče,...) in specialne izolacijske plošče iz razvlaknjenega lesa. Od lesnih tvoriv imajo najboljše lastnosti namenske izolativne vlaknene ali iverne plošče z različnimi dodatki kot npr. kokosova vlakna.

Les je dober izolativni material zaradi nizke toplotne prevodnosti ter nizke specifične toplote. Na toplotno prevodnost lesa pa vplivajo dejavniki kot so gostota lesa in lesna vlažnost.

1.2 DELOVNE HIPOTEZE

Pri uporabi lesa se kot najpogostejša težava pojavi vlažnosti lesa, ki vpliva na njegovo delovanje in spremembo lastnosti. Les, ki je namenjen izolaciji, je izpostavljen različnim vremenskim vplivom kot so dež, sneg, sonce, toča, itd., zaradi higroskopnosti pa se odziva tudi pri spremenljivi relativni zračni vlažnosti. Les ima najboljše izolacijske lastnosti, ko je suh, zato je potrebno, da les zaščitimo z zaščitnim premazom, ki prepreči njegovo navlaževanje ali pa preprečiti vdor vlage. Proti negativnim zunanjim vplivom lahko les zaščitimo z vodoobojnimi sredstvi ali pa les fizično ločimo od zunanjih vplivov.

Za preprečitev prodiranja vode v les se najpogostejše uporabljajo namenska premazna sredstva, ki so nepropustna za vlago in vodo. Za zaščito opažnih plošč se pogosto uporabljajo melaminski premazi, ki delujejo vodoodbojno in preprečujejo prodiranje vode v les. Vendar pa lesno tkivo še vedno zadrži higroskopske lastnosti, zato se vlažnost plošč v njihajočih spremembah relativne zračne vlažnosti še vedno spreminja. Predpostavljamo, da melaminski premazni sistemi vplivajo le na hitrost odzivanja plošč, razlike v končnih ravnovesnih vlažnostih pa so neznčilne. Posledično menimo, da na toplotno prevodnost in termično difuzivnost melaminski premaz ne bo vplival, pričakujemo pa odvisnost toplotnih lastnosti plošč od njihove vlažnosti.

1.3 CILJI RAZISKAVE

Osnovna zahteva opažnih plošč ni njihova toplotna izolativnost, vendar se pogosto postavlja tudi vprašanje o njeni toplotni prevodnosti predvsem zaradi pričakovanega velikega vpliva vlažnosti, ki je pri teh ploščah zelo pogosta. V nalogi smo zato želeli proučiti:

- hitrost spreminjanja temperature plošče v odvisnosti od vlažnosti opažne plošče;
- primerjavo termične difuzivnosti opažnih plošč z melaminsko impregnacijo z opažnimi ploščami brez impregnacije pri različnih vlažnostih;
- vpliv površinskega premaza na toplotno prevodnost opažnih plošč.

2 PREGLED LITERATURE

2.1 TOPLOTNE LASTNOSTI LESA

Les je slab prevodnik toplote, hkrati se tudi počasi segreva vendar tudi počasi ohlaja. Zaradi teh lastnosti je primeren material, ki ga izkoriščamo v gradnji lesenih hiš. Pri uporabi ga za lesene pode (parketi), zunanje in notranje stenske obloge izkoriščamo tudi njegove ugodne toplotno izolacijske lastnosti. Toplotna prevodnost ni pri vseh lesnih vrstah enaka in je odvisna od gostote, vlažnosti lesa, usmerjenosti vlaken, debeline celične stene, poroznosti in ostalih strukturnih značilnosti (Gorišek, 2009).

Temperatura ima zelo velik vpliv na lastnosti lesa kot konstrukcijski material kot so: toplotne, mehanske in akustične lastnosti, krčenje in nabrekanje, higroskopnost, itd. Med toplotnimi lastnostmi najpogosteje obravnavamo raztezek in skrček, toplotno prevodnost, toplotno kapaciteto in specifično toploto.

2.1.1 Toplotne dilatacije lesa

Kot večina materialov se tudi les pri različnih temperaturah obnaša različno. Pri spremembi temperature pa opazamo tudi dimenzijsko delovanje lesa. Pri segrevanju se dimenzije povečujejo pri ohlajevanju pa se dimenzije zmanjšujejo. Ta pojav imenujemo toplotna dilatacija. Do povečanja dimenzij lesa pri povišanju temperature prihaja zaradi razmikajočih se molekul, ker se zaradi višje temperature povečuje amplituda oscilirajočih molekul (Kollmann, Cote, 1993).

Pojav dimenzijskih sprememb zaradi temperaturnih sprememb označujemo z toplotnimi raztezki (α), ki nam povedo za koliko se poveča dimenzija telesa, če se temperatura spremeni za 1 K (Fan in sod. 2009).

Ker je les anizotropen, pomeni, da se v različnih smereh različno odziva. Najmanjšo toplotno dilatacijo ima v vzdolžni smeri, nekoliko večjo v radialni smeri in največjo v tangencialni smeri (Preglednica 1).

Preglednica 1 Linearni toplotni raztezki nekaterih lesnih vrst v vzdolžni (α_L), radialni (α_R) in tangencialni (α_T) smeri. (Goričanec, Črepinšek – Lipuš, 2008).

	Vzolžno (α_L) [10 ⁻⁶ K ⁻¹]	Radialno (α_R) [10 ⁻⁶ K ⁻¹]	Tangencialno (α_T) [10 ⁻⁶ K ⁻¹]
Črni bor	4,0	18,4	72,7
Smreka	5,41	6,3	34,1
Bukev	5,4	22,0	34,8
Jelka	3,7	15,8	58,4
Hrast	4,92	11,1	54,7
Jesen	9,5		
Kostanj	6,5		32,5
Steklo	9,0		
Aluminij	24,0		
Jeklo	11,0		

2.1.2 Specifična toplota lesa

Specifična toplota lesa je večja kakor pri kovinah in podobnih materialih ter je vezana na nizko toplotno prevodnost. Specifična toplota ni posebno odvisna od lesne vrste in gostote, odvisna pa je od vlažnosti lesa in narašča s temperaturo. Specifična toplota sušilnično suhega lesa je približno 1,3567 kJ/kgK (Siau, 1995). Specifično toploto lesa v odvisnosti od vlažnosti zapišemo z enačbo:

$$c_u = \frac{(u \cdot c_{vode} + c_0)}{1+u} \quad \dots(1)$$

ker je:

c_uspecifična toplota vlažnega lesa,

ulesna vlažnost (kg/kg),

c_{vode}specifična toplota vode (4,185 kJ/kgK) in

c_0specifična toplota suhega lesa (1,36 kJ/kgK).

2.2 PRENOS TOPLOTE

Kot prenos toplote se obravnava procese, pri katerih nastane energijski tok zaradi razlike v temperaturi med telesi ali na določeni razdalji. Toplotni tok je spontan prenos toplote z mesta z višjo temperaturo na mesto z nižjo temperaturo. Prenos preneha, ko se temperaturi mest izenačita.

V širšem smislu razumemo pod prenosom toplote tri procese (Koloini, 2009):

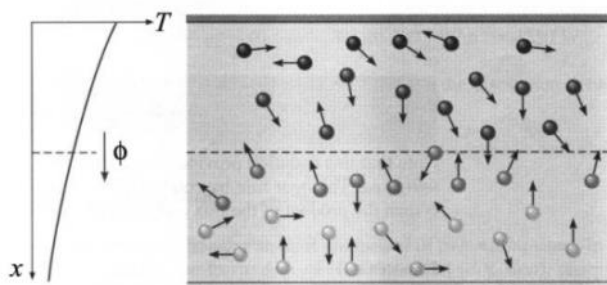
- prevajanje toplote ali kondukcija v trdninah in mirujočih tekočinah;
- prestop toplote ali konvekcija v tekočinah in
- sevanje toplote ali radiacija.

V praksi se najpogosteje srečamo s primeri kombiniranih prenosov.

2.2.1 Toplotna prevodnost (kondukcija)

Prevajanje toplote se pojavi v tekočinah, trdih predmetih ter plinih. V tekočinah se toplota prenaša z difuzijskim gibanjem molekul. Pri trdnih predmetih toploto prenašajo prosti elektroni, poleg tega se prenaša tudi vibracijska energija atomov. Pri plinih se prenaša toplota z gibanjem molekul (Goričanec in Črepinšek –Lipuš, 2008).

Mehanizem prevoda toplote ponazarja slika 1. Sestavni delci snovi (atomi, molekule, ioni, elektroni) vibrirajo, rotirajo in se gibljejo premočrtno. Pripadajoča kinetična energija raste z rastočo temperaturo. Ko ti delci trkajo med seboj, se kinetična energija prenaša iz območja višje temperature v območje z nižjo temperaturo. Takšen način prenosa toplote se imenuje prevod toplote in je najbolj izražen v trdnih snoveh, čeprav se pojavlja tudi v tekočinah (Goričanec in Črepinšek –Lipuš, 2008).



Slika 1. Prevod toplote (Goričanec, Črepinšek – Lipuš, 2008).

Enodimenzionalno prevajanje toplote opisujemo s Fourierjevim zakonom.

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad \dots(2)$$

kjer je:

qtoplotni tok [J/s]

λtoplotna prevodnost [W/mK],

dTsprememba temperature [K] in

dxdebelina [m].

Parameter λ [W/mK] je toplotna prevodnost snovi, ki je v splošnem odvisna od vrste snovi, temperature in tlaka. Pri zmernih tlakih je za trdne snovi, kapljevine in celo pline odvisna le od temperature. Pri nekaterih snoveh jo lahko v ožjem temperaturnem območju jemljemo kot konstanto, v splošnem pa zadošča linearna aproksimacija glede na temperaturo.

Na toplotno prevodnost lesa vpliva več parametrov kot so: gostota, vlažnost, struktura lesa, temperatura, ekstraktivi in rastne anomalije (Preglednica 2).

Toplotni tok je najučinkovitejši v vzdolžni smeri, kjer je toplotna prevodnost približno dvakrat večja kakor radialno ali tangencialno.

Povprečne vrednosti so (Gorišek, 2009):

- vzdolžno 0,223 W / mK - 0,331 W / mK,
- radialno 0,121 W / mK - 0,176 W / mK in
- tangencialno 0,105 W / mK - 0,174 W / mK.

Preglednica 2 Primerjava toplotne prevodnosti lesa z drugimi gradbenimi materiali (Siau 1995).

Material	Koeficient toplotne prevodnosti λ (W/mK)
Les G = 0,45M 12% pravokotno	0,125
Les G = 0,45M 12% vzporedno	0,313
Les G = 0,70M 12% pravokotno	0,177
Les G = 0,70M 12% vzporedno	0,444
Celična stena pravokotno	0,439
Celična stena vzporedno	0,878
Bukev	0,17
Hrast	0,21
Smreka	0,14
Iverna plošča	0,14
Plošče mineralne volne	0,047
Voda	0,692
Zrak	0,023
Vezana plošča	0,115
Iverna plošča	0,105
Vlaknena plošča	0,134
Azbestna plošča	0,576
Opeka	0,721
Beton	0,937
Kamen, pesek	1,802
Steklo	1,051
Steklena vlakna	0,039
Ekspandiran polistiren	0,023
Srebro	418,26
Baker	386,53
Aluminij	201,919
Jeklo	16,297

Toplotna prevodnost narašča z naraščajočo gostoto, lesno vlažnostjo in temperaturo. Vpliv gostote na prečno prevodnost je v območju gostot od 200 kg/m^3 do 800 kg/m^3 pri 25°C podana z enačbo:

$$\lambda = 0,207 * R_u + 0,023 \left[\frac{W}{mK} \right] \quad \dots (3)$$

kjer je:

λtoplotna prevodnost [W/mK] in

R_unominalna gostota pri vlažnosti 12%.

V higroskopskem območju je hitrost spremembe toplotne prevodnosti od 0,7 % do 1,25 %, povprečno pa 1,18 % na 1 % spremembe lesne vlažnosti. Tako lahko skupni vpliv gostote in vlažnosti predstavimo kot:

$$\lambda = 0,165 + \rho_0(1,39 + 0,038u) \quad \dots (4)$$

kjer je:

λ toplotna prevodnost [W/mK],

ρ_0gostota lesa v absolutnem suhem stanju [kg/m³] in

uvlažnost lesa [%].

Pri nižjih temperaturah je les nekoliko boljši izolator saj z naraščajočo temperaturo narašča tudi toplotna prevodnost:

$$\lambda = \lambda_0 * (\rho_0 + b * T) \quad \dots (5)$$

kjer je:

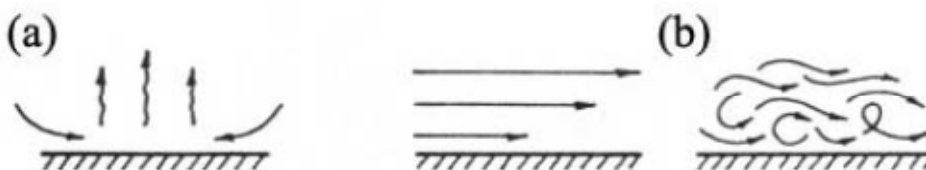
λ toplotna prevodnost pri temperaturi izraženi v °C [W/mK],

λ_0 toplotna prevodnost pri 0 °C [W/mK] in

bkorekturni faktor poroznosti lesa.

2.2.2 Toplotna prestopnost (konvekcija)

Ko je prvotno mirujoča tekočina v stiku s toplejšo površino, se njeni deli segrevajo, posledično pade njihova gostota, zato se zaradi vzgona pričnejo dvigati, na njihovo mesto pa doteka sveža tekočina. Ta pojav imenujemo naravna konvekcija. Takšno gibanje makroskopskih delcev povzroči bistveno hitrejši prenos toplote, kot je sam prevod skozi tekočino. Ko je gibanje tekočine povzročeno npr. z mešalom, črpalko ali ventilatorjem, govorimo o prisilni konvekciji. Mešanje tekočinskih delcev se vrši predvsem zaradi vztrajnostnih sil, ki lahko prevladujejo nad vzgonskimi, zato je prestop toplote še intenzivnejši kot pri naravni konvekciji. Mehanizem prestopa toplote ponazarja slika 2.



Slika 2. Shema tokovnic pri (a) naravni konvekciji, (b) prisilni konvekciji (Goričanec, Črepinšek –Lipuš 2008) .

Toplotni prestop je prenos med površino trdega telesa in kapljevino – gibanje makroskopskih delcev tekočine in medsebojno mešanje. Izračunamo lahko toplotni tok segrevanja kot tudi toplotni tok ohlajanja (Newtonov zakon).

$$Q = h \cdot \Delta T \quad \dots(6)$$

kjer je:

Q toplotni pretok zaradi konvekcije [W/m^2],

h toplotna prestopnost [$\text{W}/\text{m}^2 \text{ K}$] in

ΔT temperaturna razlika [K].

Koeficient toplotne prestopnosti je odvisen od vrste tekočine, od geometrije površine in režima gibanja tekočine, saj vsi ti dejavniki vplivajo na debelino mejnega sloja in na temperaturno porazdelitev v njem. Hrapava površina, na primer, ima višjo toplotno prestopnost kot gladka zaradi večje površine, razpoložljive za prenos toplote in intenzivnejšega vrtinčenja.

2.2.3 Sevanje (radiacija)

Sevanje je posledica nihanja elektrine pri termičnih trkih osnovnih gradnikov snovi. Pri trku pride do trenutne deformacije elektronskih oblakov, zaradi katere potem še kratek čas elektrina niha in pri tem oddaja elektromagnetne valove. Znotraj snovi se valovi absorbirajo, do izraza pa pridejo valovi, ki jih sevajo gradniki tik pod površjem snovi (Goričanec, Črepinšek –Lipuš 2008).

Prenos toplote s sevanjem se razlikuje od kondukcijskega in konvekcijskega prenosa toplote prvič po tem, da se lahko vrši tudi skozi prazen prostor, in drugič, da je prenesena toplota sorazmerna temperaturi na četrto potenco. Čeprav pri sobni temperaturi seva vsaka snov, je večinoma potrebno sevalni prenos toplote upoštevati šele pri visokih temperaturah. Prenos energije se izvaja z elektromagnetnim valovanjem dolžine med 10^{-4} m in 10^{-7} m.

2.3 TOPLOTNA IZOLATIVNOST

Za toplotno izolacijo se uporabljajo predvsem namensko narejene plošče iz poroznih materialov ter tudi iz vlaken ali iveri, ki izboljšajo izolativnost v primerjavi z masivnim lesom. Pri zagotavljanju toplotne izolacije je potrebno paziti na preprečevanje toplotnih mostov, toplotne stabilnosti v letnem času, zaščite gradbenega dela stavbe pred velikimi toplotnimi dilatacijami (Goričanec in Črepinšek –Lipuš 2008).

2.3.1 Najbolj pogosto uporabljeni materiali

- Ekspandirani polistiren - najbolj znan kot stiropor, je trda pena iz polistirena. Njegova toplotna prevodnost znaša 0,040 W/mK. Je brez vonja in zaradi zaprte celične strukture ne prepušča vodne pare.
- Ekstrudirani polistiren - toplotno izolacijsko gradivo iz polistirena, ki ima visoko tlačno trdnost, ne vpija vode in je odporen na staranje. Njegova toplotna prevodnost je 0,024 – 0,033 W/mK.
- Kamena volna - material iz dveh kamnin (diabaza in dolomita), ki se jih najprej raztali, nato pa z razvlaknjevanjem mase nastane kamena volna. Stisnjena volna v plošče ima lahko različne gostote. Njegova toplotna prevodnost znaša 0,038 W/mK.
- Steklена volna - je najpogostejše uporabljen material za toplotno izolacijo. Sestavljena je iz steklenih vlaken, stisnjenih v plošče različne gostote in trdnosti. Njena toplotna prevodnost znaša 0,033 – 0,045 W/mK.
- Celulozni kosmiči - celulozna toplotna izolacija se pridobiva iz starega časopisnega papirja, katerega toplotna prevodnost meri 0,0333 W/mK. Zmlete drobne časopisne kosmiče se impregnira z borovo soljo. S tem postane gradivo odporno proti ognju, škodljivcem in plesnijo.
- Lesna vlakna - les je naravno gradivo, ki ima ugodno toplotno prevodnost (0,040 W/mK). Tako ima 10 cm masivnega lesa iglavca enako toplotno izolativnost, kot 160 cm debela betonska stena.
- Pluta - je lubje hrasta plutovca, ki se obrezuje vsakih 8-9 let. Je lahek in elastičen material, ki ni občutljiv na vlago in nizke temperature, ne trohni in ne gnije. Njena slaba lastnost je vnetljivost, a pri gorenju ne nastajajo strupeni plini (Balaskó, 2012).

2.3.2 Lesni kompoziti namenjeni toplotni izolaciji

Iverne plošče iz konopljinega osleza imajo nizko gostoto od $0,1 \text{ g/cm}^3$ do $0,3 \text{ g/cm}^3$ relativno dobre mehanske lastnosti in zadovoljive dimenzijske stabilnosti. Toplotna izolativnost je primerljiva s stekleno volno. Poleg toplotne izolativnosti ima tudi dobro zvočno izolativnost. Ne vsebuje formaldehida kar pripomore, da so plošče zdravju prijaznejše (Balasko, 2012).

Prednost plošče iz durianove lupine in kokosa je v tem, da so materiali dostopni. Razmerje je 10% durianove lupine in 90% kokosovih vlaken, gostota se giblje okoli 850 kg/m^3 .

Vezane sendvič plošče se najpogosteje uporablja za konstrukcijske namene poleg tega imajo tudi dobre toplotno izolativne lastnosti. Gostota je relativno nizka od 350 kg/m^3 do 400 kg/m^3 . Debelina sendvič plošče je 96 mm. Stranska sloja vezane plošče sta 10 mm medtem ko je srednji sloj izdelan iz lesnih vlaken z nizko gostoto 76 mm. Sendvič plošče imajo boljše lastnosti toplotne izolativnosti od ostalih lesnih plošč s področja toplotne izolativnosti. Boljše lastnosti imajo tudi pri ohranjanju toplote v prostoru.

3 MATERIAL IN METODE

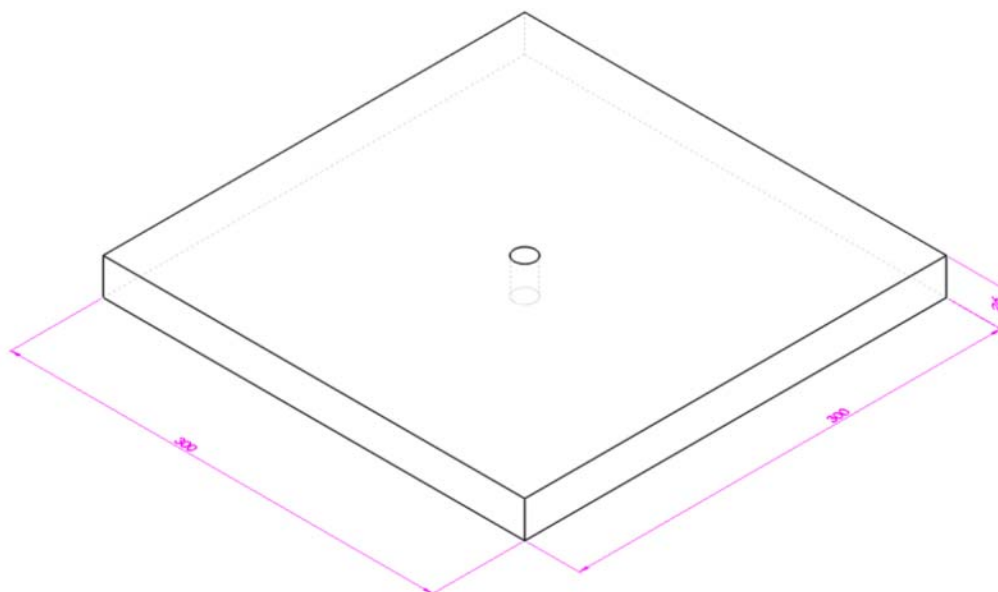
3.1 MATERIAL

Za izvedbo preizkusov smo uporabljali tri slojne opažne plošče velikosti 300 mm x 300 mm in debeline 26 mm (Slika 3.). Toplotne lastnosti smo proučevali na nezaščitenimi in z melaminskim premazom zaščitenimi ploščami; ; prvih smo imeli 8, drugih pa 10. Po tri zaščitene in nezaščitene plošče - preizkušance smo uravnovesili na relativnih zračnih vlažnostih 33%, 65% in 87%.

Plošče so bile sestavljene iz treh slojev masivnega smrekovega lesa. Debelina zunanjih slojev je bila 8 mm srednjega pa 10 mm.

Gostota nezaščitenih plošč je bila od 350 kg/m^3 do 430 kg/m^3 , gostota plošč z zaščitnim melaminskim slojem pa je bila od 406 kg/m^3 do 460 kg/m^3 .

Pred pričetkom izvajanja poizkusa smo plošče uravnovesili v komorah z različnimi relativnimi zračnimi vlažnostmi (RZV), ki smo jih uravnavali z nasičenimi vodnimi raztopinami različnih soli. Preizkušance smo uravnovesili nad nasičeno raztopino magnezijevega klorida (MgCl_2) (RZV = 33%), natrijevega nitrata (NaNO_2) (RZV=65%) in cinkovega sulfata (ZnSO_4) (RZV = 86%). Prostor je bil termostatiran na temperaturo 20°C .



Slika 3. Preizkušanec za merjenje hitrosti segrevanja in toplotne prevodnosti.

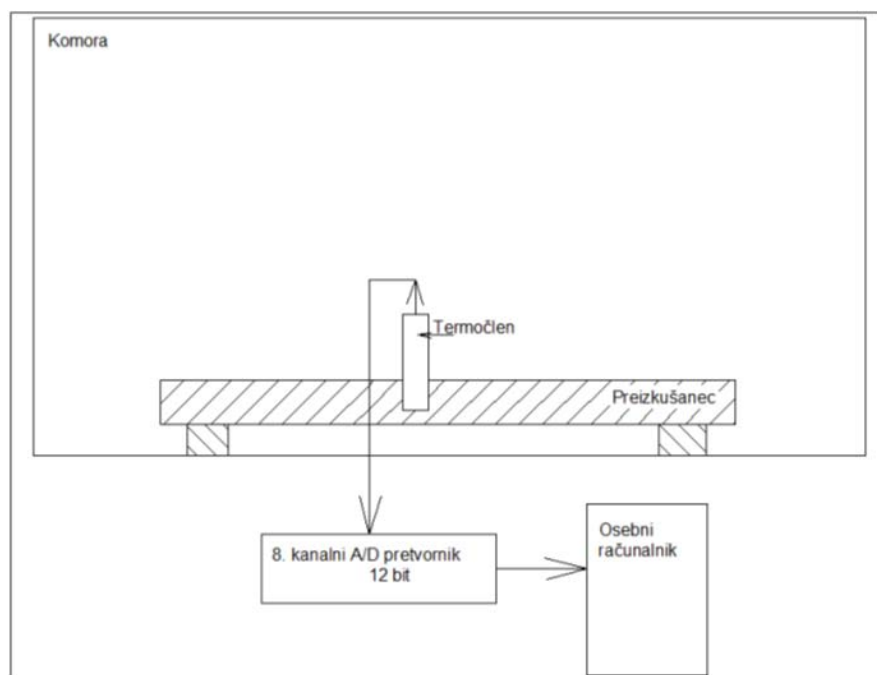
3.2 METODE

3.2.1 Merjenje temperaturnega gradienta

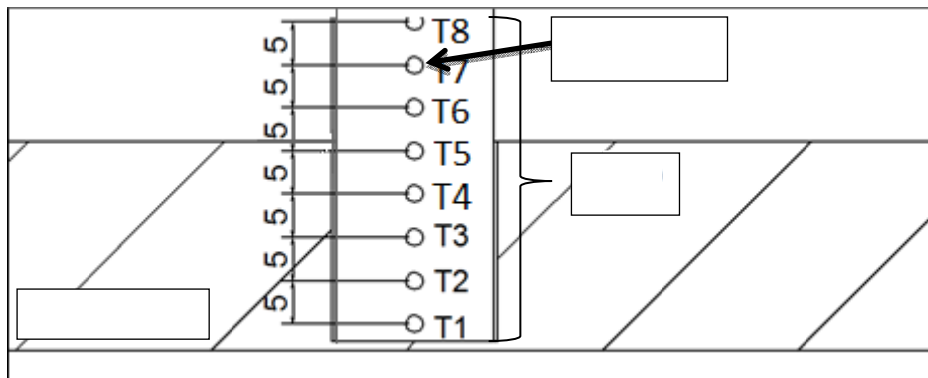
Uravnovešene plošče smo označili po vlažnostnih razredih; od najnižje do najvišje vlažnosti. Nezaščitene opažne plošče smo označili s števkami od 1 do 8. Zaščitene preizkušance z melaminskim premazom pa od 11 do 20. V plošče smo nato izvrtali luknje, kamor smo vstavili sondo s termočleni. Globina izvrtin je bila okoli 21 mm in je segala nekoliko čez polovico debeline. Nato smo preizkušance stekali, jim zmerili vlažnost z elektro-uporovnim vlagomerom ter jih ponovno uravnovesili.

V izvrtino preizkušancev smo vstavili sondo s termočleni in jo pritrdili tako, da so bili termočleni v stiku z lesom. Termočlene smo preko pretvornega sistema za zajemanje podatkov priključili na računalnik (Slika. 4). Sondo smo izdelali iz plastične cevi v kateri smo na razdalji 5 mm vstavili krom-nikljeve termočlene, ki so imeli preko manjših izvrtin v sondi direkten kontakt z lesom (Slika 5 in Slika 6). V sondu je bilo vstavljenih 8 termočlenov; s petimi smo merili temperaturo po globini izvrtine, ostali trije pa so merili zunanjo temperaturo.

Sondo smo pokrili s peno in preprečili nekontrolirano segrevanje termočlenov.



Slika 4. Shema sistema za zajemanje fizikalnih parametrov.



Slika 5. Shema termočlenov v sondi.

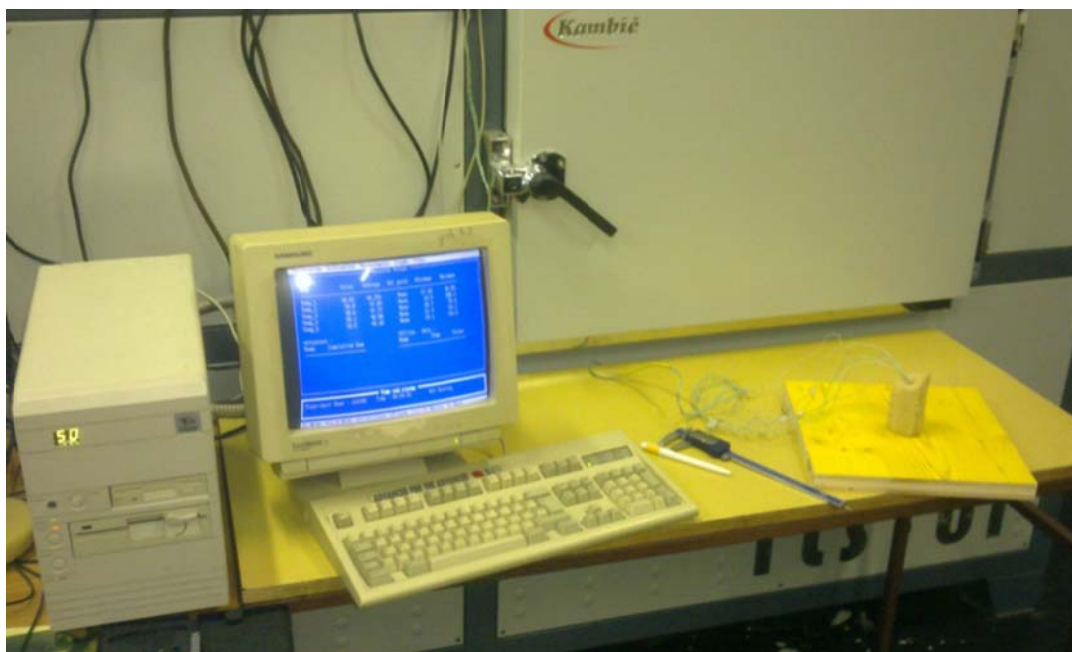


Slika 6. Merilna sonda s termočleni za merjenje temperature pri različnih globinah.

3.2.2 Zajem podatkov in izračun toplotnih karakteristik

Preko A/D pretvornika smo podatke, ki smo jih beležili v 6 sekundnem intervalu, s programom SHIVA shranjevali v računalnik (slika 7). S programom SHIVA smo pred meritvijo izvedli tudi dvo-točkovno kalibracijo termočlenov, med 0 °C (tekoča voda z ledom) in 100 °C (vrela voda pri normalnem zračnem tlaku; $P = 101,325 \text{ kPa}$)

Plošče smo v komori (Slika 8, Slika 9) segrevali z začetne temperature 20 °C na temperaturo 60



Slika 7. Zapis meritev z računalniškim programom SHIVA.



Slika 8. Komora za segrevanje plošč.



Slika 9. Uravnovešanje plošč.

Iz podatkov smo določili brezdimenzijsko temperaturo segrevanja:

$$\theta = \frac{T - T_0}{T_1 - T_0} \quad \dots (7)$$

kjer je:

θ brezdimenzijska temperatura,

T_1 končna temperatura [°C],

T_0 začetna temperatura [°C] in

T trenutno izmerjena temperatura [°C].

Za izračun termične difuzivnosti smo uporabili naslednje formule:

$$\alpha = \frac{L^2}{t} \quad \dots (8)$$

kjer je:

α termična difuzivnost [m²/s],

L polovična debelina preizkušanca [m],

t čas [s].

Termična difuzivnost je odvisna od toplotne prevodnosti, gostote ter specifične toplote lesa:

$$a = \frac{\lambda}{\rho c_u} \quad \dots(9)$$

kjer je:

λtoplotna prevodnost [W/mK],
 ρgostota [kg/m³] in
 c_uspecifična toplota lesa [J/kgK].

Iz zgornjih enačb smo izpeljali zvezo za izračun koeficienta toplotne prevodnosti:

$$\lambda = - \frac{8 \cdot L^2 \cdot \rho_u \cdot c_u \cdot \ln \theta}{\pi \cdot t} \quad \dots(10)$$

kjer je:

Lpolovična debelina [m],
 ρ_ugostota pri vlažnosti u [kg/m³],
 θbrezdimenzijska temperatura [],
 tčas segrevanja [s] in
 c_uspecifična toplota lesa pri vlažnosti u [J/kgK].

Specifično toploto lesa pri določeni vlažnosti smo izračunali iz:

$$c_u = x \cdot c_{vode} + (1 - x) \cdot c_o \quad \dots(11)$$

ker je:

xabsolutna vlažnost lesa [kg/kg],
 c_{vode}specifična toplota vode [$c_{vode} = 4,185$ kJ/kgK] in
 c_o specifična toplota suhega lesa [$c_o = 1,36$ kJ/kgK].

Polovični čas segrevanja smo odčitali iz dobljenih podatkov, ko je termočlen dosegel temperaturo 40 °C. To smo storili za vse preizkušance in nato izračunali povprečje pri posameznih vlažnostih opažnih plošč.

4 REZULTATI

4.1 RAVNOVESNA VLAŽNOST IN GOSTOTA PREIZKUŠANCEV

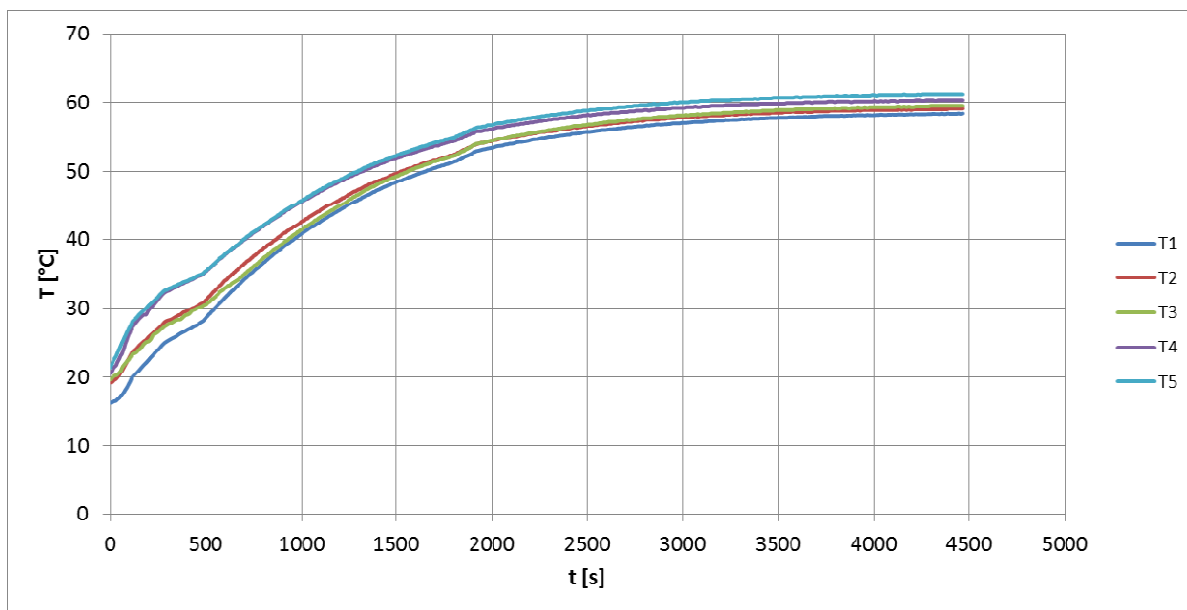
Povprečne ravnovesne vlažnosti plošč pri relativni zračni vlažnosti 33 % so bile 6,1 % pri nepremazanih in 5,6 % pri z melaminsko smolo površinsko premazanih ploščah. Pri ploščah uravnovešenih v normalni klimi (RZV = 65 %) so bile odgovarjajoče ravnovesne vlažnosti 9,3 % in 8,4 %, medtem, ko so se pri relativni zračni vlažnosti 86% plošče uravnovesile na 12,7 % oziroma 13,9 % (Preglednica 3).

Preglednica 3 Relativna in absolutna vlažnost nepremazanih in premazanih plošč uravnovešenih na treh nivojih relativne zračne vlažnosti ter gostota plošč v absolutno suhem stanju.

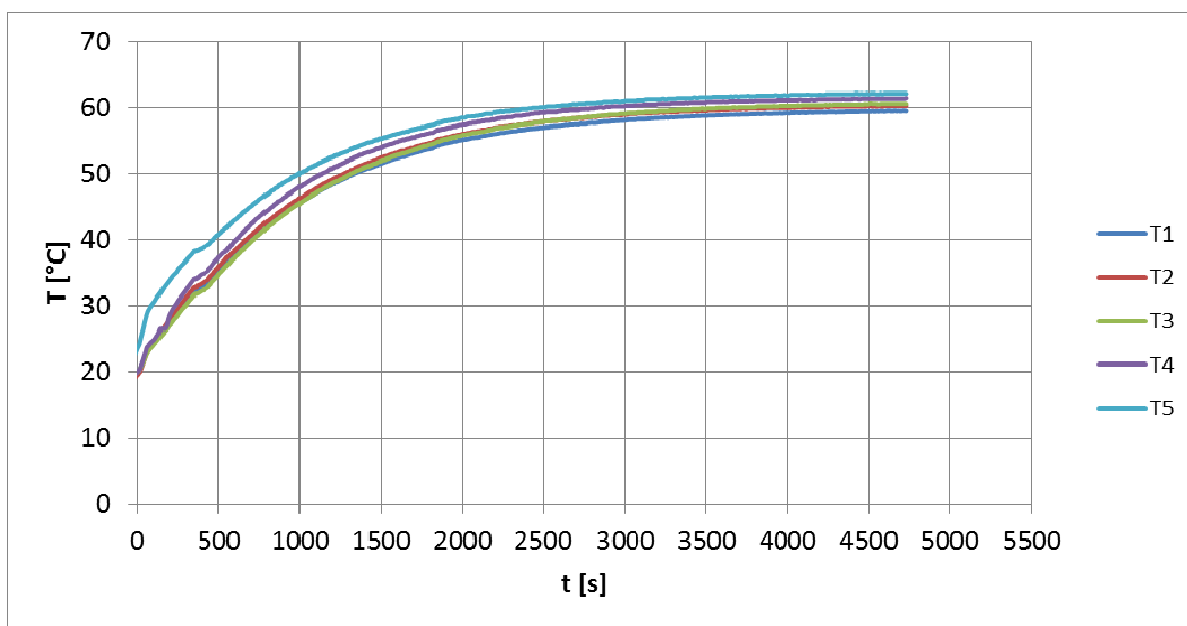
Preizkušanec	Relativna zračna vlažnost uravnovešanja φ [%]	Lesna vlažnost u [%]	Absolutna vlažnost x [%]	Gostota ρ_0 [kg/m ³]
Nepremazane plošče {1,2,3}	30,0	6,1	5,8	414
Nepremazane plošče {4,5,6}	65,0	9,3	8,4	402
Nepremazane plošče {7,8}	86,0	12,7	11,25	391
Premazane plošče {11,12,13}	30,0	5,6	5,3	442
Premazane plošče {14,15,16}	65,0	8,4	7,7	421
Premazane plošče {17,18,19,20}	86,0	13,9	12,2	423

4.2 HITROST SEGREVANJA OPAŽNIH PLOŠČ

Hitrost segrevanje opažnih plošča smo spremljali na različnih globinah na intervalih po 5 mm. Iz meritev smo ugotovili, da so se preizkušanci, ki niso bili zaščiteni z melaminskim premazom, hitreje segrevali kakor preizkušanci, ki so bili premazani z melaminskim premazom (Slika 10, 11). Razlog je v tem, da melaminski premaz upočasni prehod toplote skozi površino ali pa je toplotna prevodnost manjša in tako upočasni segrevanje opažne plošče.



Slika 10. Hitrost segrevanja nepremazanih plošč na različnih globinah nazaščitenih plošč: T1 – površina; T2 – 5 mm pod površjem; T3 – 10 mm pod površjem; T4 – 15 mm pod površjem in T5 – 20 mm pod površjem.



Slika 11. Hitrost segrevanja plošč premazanih z melaminsko smolo na različnih globinah zaščitenih plošč: T1 – površina; T2 – 5 mm pod površjem; T3 – 10 mm pod površjem; T4 – 15 mm pod površjem in T5 – 20 mm pod površjem.

4.3 POLOVIČNI ČAS SEGREVANJA

Ugotavljali smo čas v katerem je bila dosežena polovična razlika temperature segrevanja med 20 °C in 60 °C (t.j. pri pribl. 40 °C). Iz dobljenih podatkov hitrosti segrevanja smo odčitali čas ki je bil dosežen, ko so se posamezni termočleni segreli na 40 °C. Ugotovili smo, da je polovični čas segrevanja pri nepremazanih preizkušancih krajši kot pri premazanih preizkušancih. Razlike se pojavijo tudi pri različnih ravnovesnih vlažnostih, saj imajo preizkušanci z nižjo vlažnostjo daljši polovičen čas segrevanja, kar pomeni, da potrebujejo več časa da se segrejejo (Preglednica 4.).

Preglednica 4 Polovični uravnovesni časi nepremazanih in premazanih preizkušancev.

Preizkušanec	Relativna zračna vlažnost uravnovešanja ϕ [%]	Polovični uravnovesni čas t [min]
Nepremazane plošče {1,2,3}	33,0	13,6
Nepremazane plošče {4,5,6}	65,0	6,6
Nepremazane plošče {7,8}	86,0	12,5
Premazane plošče {11,12,13}	33,0	11,7
Premazane plošče {14,15,16}	68,0	14,2
Premazane plošče {17,18,19,20}	86,0	16,7

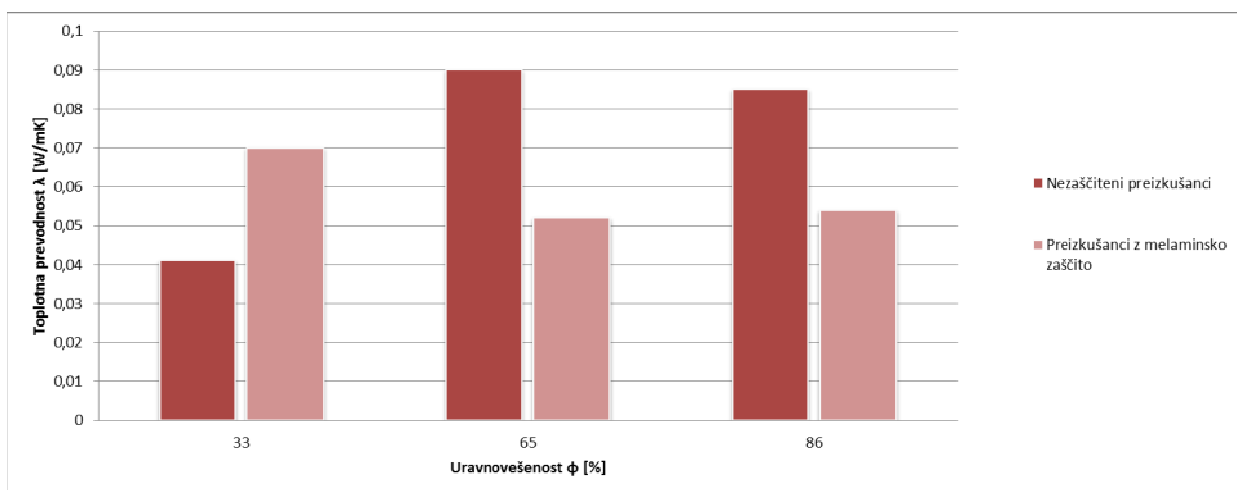
4.4 TOPLOTNA PREVODNOST IN TERMIČNA DIFUZIVNOST PLOŠČ

Povprečne termične difuzivnosti plošč uravnovešene pri relativni zračni vlažnosti 33 % so bile $6,14 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ pri nepremazanih in $9,54 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ pri ploščah površinsko premazanih z melaminsko smolo. Pri ploščah uravnovešenih v normalni klimi (RZV = 65 %) so bile odgovarjajoče termične difuzivnosti $1,22 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ in $7,35 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ medtem, ko je bila termična difuzivnost pri višji vlažnosti 86% $1,35 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ oziroma $6,49 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ (Preglednica 5 ter Sliki 12 in 13).

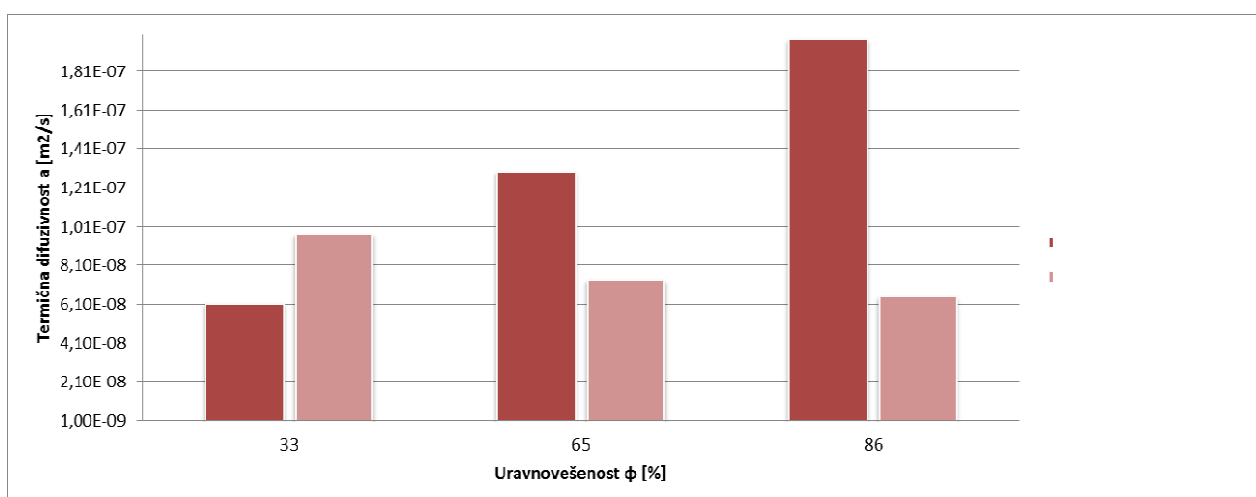
Povprečne vrednosti toplotne prevodnosti pri ploščah uravnovešenih pri relativni zračni vlažnosti 33 % so bile pri nepremazanih ploščah 0,041 W/mK, pri premazanih ploščah pa 0,09 W/mK. Nepremazane plošče uravnovešene pri relativni zračni vlažnosti 65% so imele toplotno prevodnost 0,09 W/mK medtem ko so imele premazane plošče pri isti relativni zračni vlažnosti 0,052 W/mK. Pri 86% relativni zračni vlažnosti uravnovešanja so imele nepremazane plošče toplotno prevodnost 0,085 W/mK, pri premazanih ploščah pa je znašala 0,54 W/mK.

Preglednica 5 Toplotna prevodnost (λ) in termična difuzivnost (α) nepremazanih (1 – 8) in premazanih (11 – 20) plošč uravnovešenih na treh nivojih relativne tračne vlažnosti.

Preizkušanec	Relativna zračna vlažnost uravnovešanja ϕ [%]	Toplotna prevodnost λ [W/mK]	Termična difuzivnost α [m^2/s]
Nepremazane plošče {1,2,3}	33,0	0,041	$6,14 \times 10^{-8}$
Nepremazane plošče {4,5,6}	65,0	0,09	$1,22 \times 10^{-7}$
Nepremazani plošče {7,8}	86,0	0,085	$1,35 \times 10^{-7}$
Premazane plošče {11,12,13}	33,0	0,07	$9,54 \times 10^{-8}$
Premazane plošče {14,15,16}	65,0	0,052	$7,35 \times 10^{-8}$
Premazane plošče {17,18,19,20}	86,0	0,054	$6,49 \times 10^{-8}$



Slika 12. Povprečne vrednosti toplotne prevodnosti za nepremazane in premazane plošče v odvisnosti od klime uravnovešanja ($\phi=33\%$, $\phi=65\%$, $\phi=86\%$).



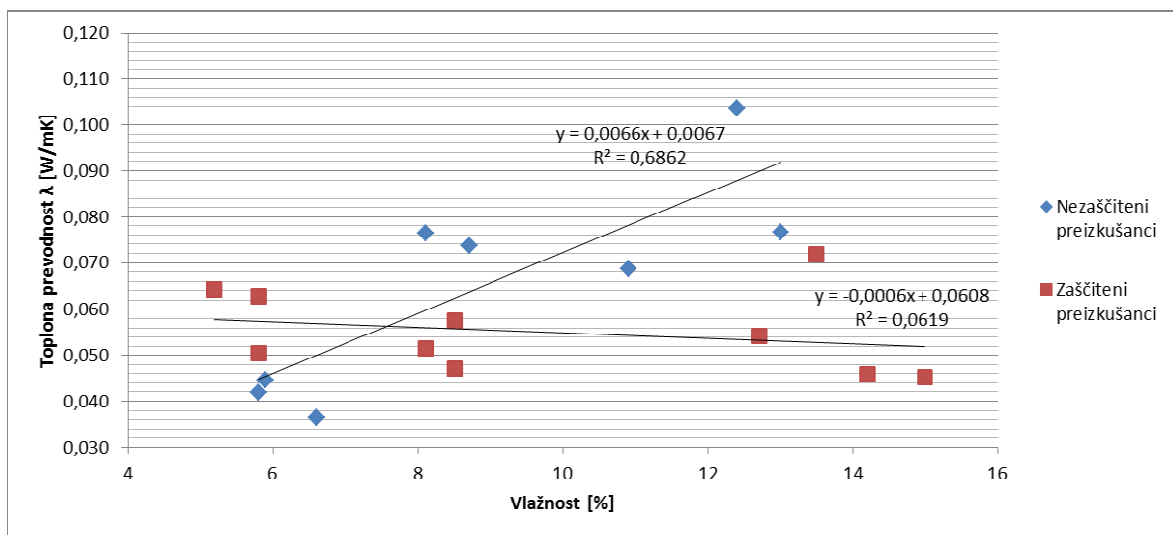
Slika 13. Povprečne vrednosti termične difuzivnosti za nepremazane in premazane plošče v odvisnosti od klime uravnovešanja ($\phi=33\%$, $\phi=65\%$, $\phi=86\%$).

5 RAZPRAVA IN SKLEPI

5.1 RAZPRAVA

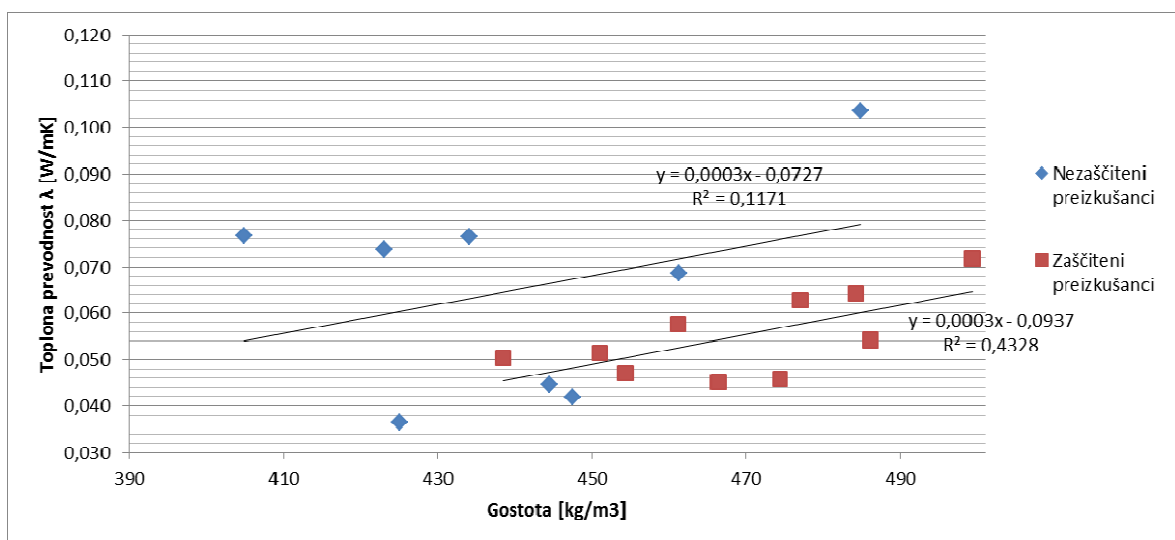
Iz proučevanja izolacijskih sposobnosti lesenih opažnih plošč smo ugotovili, da je z vlažnostjo toplotna prevodnost pri nezaščitenih ploščah naraščala, medtem ko je pri zaščitenih trend presenetljivo negativen (Slika 14). Vpliv vlažnosti je pri nezaščitenih ploščah večji saj se pri spremembi vlažnosti za 1 % toplotna prevodnost poveča za pribl. 14 %, medtem ko se toplotna prevodnost nezaščitenih plošč pri enaki spremembi vlažnosti zmanjša za le za 3 %, zveza pa je celo vprašljiva, saj je determinacijski koeficient zelo majhen ($R^2 = 0,06$) (Slika 14). Razlike toplotnih prevodnosti nezaščitenih in zaščitenih plošč lahko morda pripišemo tudi toplotni prestopnosti (gladkost površine), ki pa je v raziskavah nismo proučevali.

Toplotna prevodnost pri ploščah uravnovešenih pri relativni zračni vlažnosti 33 % so bile pri nepremazanih ploščah 0,041 W/mK, pri premazanih ploščah pa 0,090 W/mK. Pri ploščah uravnovešenih na relativni zračni vlažnosti 65% so imele nepremazane plošče povprečno toplotno prevodnost 0,090 W/mK, medtem ko je bil pri premazanih ploščah koeficient toplotne prevodnosti 0,052 W/mK. Pri 86% relativni zračni vlažnosti uravnovešanja so imele nepremazane plošče koeficient toplotne prevodnosti 0,085 W/mK, medtem ko je bil pri premazanih ploščah 0,54 W/mK.



Slika 14. Odvisnost toplotne prevodnosti opažnih plošč od njihove vlažnosti.

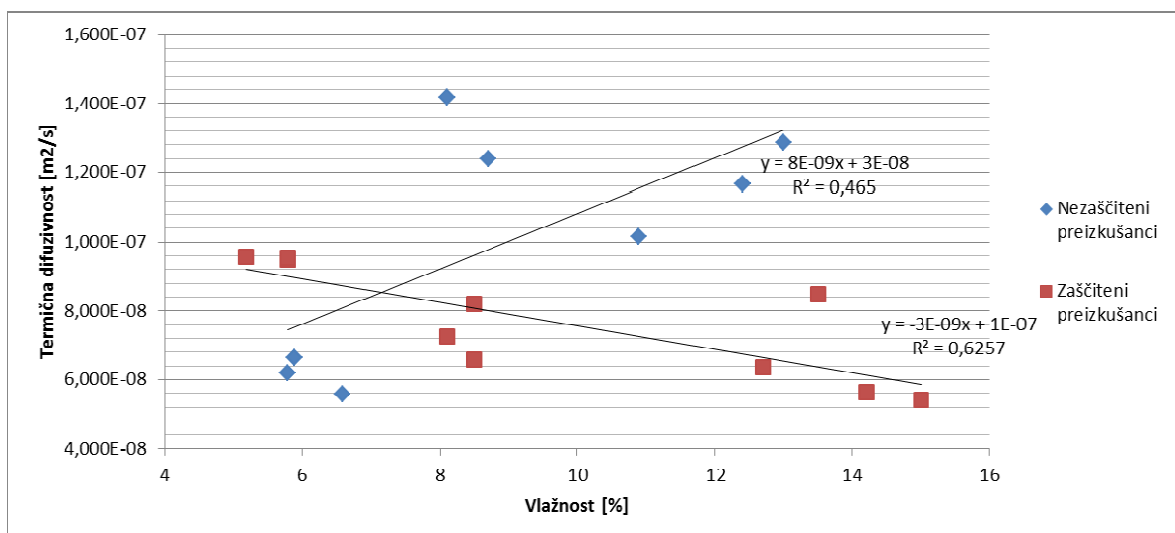
Gostota preizkušancev je nekoliko vplivala na toplotno prevodnost kar je razvidno iz slike 15. Toplotna prevodnost narašča z višanjem gostote tako pri nezaščitenih kot tudi pri zaščitenih preizkušancih z melaminskim premazom. Nezaščiteni preizkušanci so imeli višjo toplotno prevodnost kot zaščiteni preizkušanci.



Slika 15. Odvisnost toplotne prevodnosti opažnih plošč od njihove gostote pri preizkušancih.

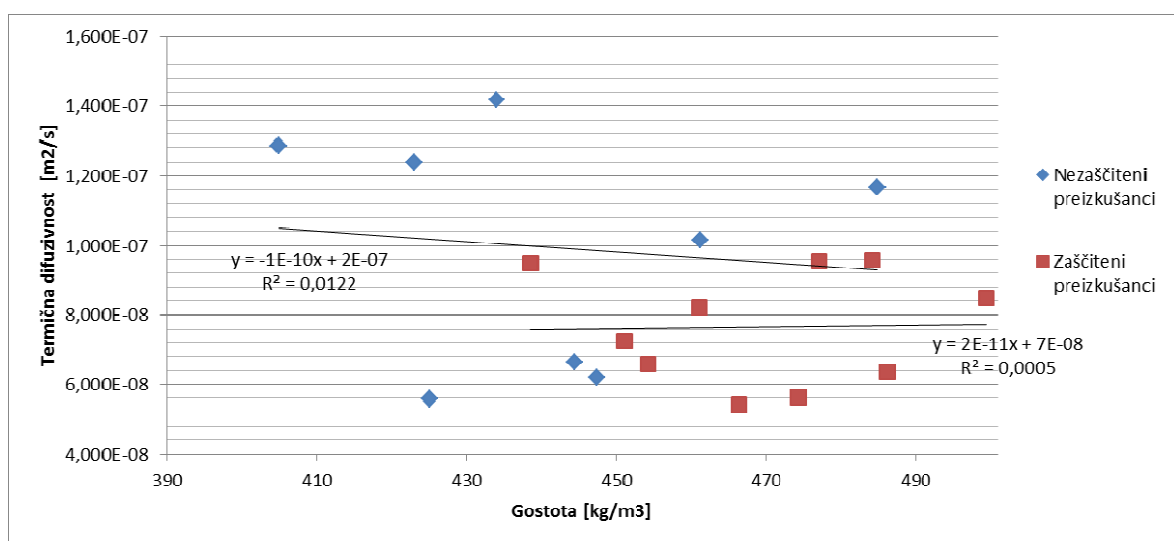
Plošče zaščitene z melaminskim premazom so imele nekoliko večji razpon gostot in je bil od 440 kg/m^3 do 500 kg/m^3 , vendar je zveza med gostoto in toplotno prevodnostjo tudi v tem primeru neznačilna (Slika 15), saj je determinacijski koeficient le 43 %.

Rezultati so pokazali, da je termična difuzivnost nezaščitenih preizkušancev pri nižjih vlažnostih primerljiva z zaščitenimi, pri višjih vlažnostih pa je višja. (Slika 16.).



Slika 16. Odvisnost termične difuzivnosti opažnih plošč od njihove vlažnosti.

Gostota ni imela velikega vpliva na termično difuzivnost niti pri nezaščitenih preizkušancih niti pri zaščitenih. Pri nezaščitenih ploščah je termična difuzivnost nekoliko padala, vendar je zveza neznačilna, medtem ko je pri zaščitenih preizkušancih termična difuzivnost ostala skoraj enaka (Slika 17).



Slika 17. Odvisnost termične difuzivnosti opažnih plošč od njihove gostote.

5.2 SKLEPI

Toplotna prevodnost in termična difuzivnost opažnih plošče je zelo variabilna, vzroki pa so v velikem številu vplivnih dejavnikov. Ugotovili smo, da na toplotne lastnosti vplivajo gostota plošč, kontaktna površina posameznih slojev, vlažnost plošč, orientacija lesa, verjetno pa še tudi ostali vzroki. Zaradi velikega raztrosa vrednosti so bile primerjave statistično neznačilne, splošno pa smo ugotovili naslednje:

Ugotovili smo, da so se plošče z melaminskim premazom pri istih vlažnostih segrevale hitreje kakor plošče, ki niso bile zaščitene z melaminskim premazom. Statistično neznačilna je bila le razlika pri uravnovešanju pri relativni zračni vlažnosti 33 %, kjer je bil polovični uravnovesni čas nekoliko krajši pri zaščiteneh ploščah.

Toplotna prevodnost nezaščiteneh preizkušancev pri 33% relativni zračni vlažnosti uravnovešanja je nižja kakor pri ploščah zaščiteneh z melaminskim premazom, pri ostalih vlažnostih uravnovešanja (65% in 86%) pa so preizkušanci zaščiteni z melaminskim premazom imeli nižjo toplotno prevodnost kakor nezaščiteni preizkušanci. Pri višjih vlažnostih so imeli zaščiteni preizkušanci 50% nižjo toplotno prevodnost kakor nezaščiteni kar pomeni, da so primernejše za izolacijo objektov kakor nezaščitene. Preizkušanci z višjo gostoto so imeli nekoliko višjo toplotno prevodnost.

Podobni so tudi rezultati pri termični difuzivnosti, kjer ima najmanjšo termično difuzivnost nezaščiteni opažni plošča pri vlažnosti uravnovešanja 33%, kjer je manj vlažnosti v celičnih stenah in se dodatno upočasni prehod toplote. Plošče zaščitene z melaminskim premazom pri višjih vlažnostih imajo nižjo termično difuzivnost kot nezaščitene plošče. Razlog je nižja ravnovesna vlažnost preizkušancev in melaminski premaz saj le ta vpliva na toplotno prestopnost na površino plošče.

6 POVZETEK

V današnjih časih je vse več poudarka na naravnih materialih v gradbeništvu. Vse več se pojavljajo montažne lesene hiše ki so v večini izdelane iz obnovljivih materialov. Za toplotno izolativnost se najpogosteje uporablja ekspandirani polistiren ter steklena volna. Hoteli smo preizkusiti toplotno izolativnost opažnih plošč z metodo merjenja s termočleni. Preizkušance smo imeli tako nezaščitene kot tudi preizkušance, ki so bili zaščiteni z melaminskim premazom.

Preizkušance smo temperaturno in vlažnostno uravnovesili ter nato izvedli poizkuse s segrevanjem plošč v termostatirani komori. Plošče s temperaturo 20 °C smo segrevali v klimi s temperaturo 65 °C in na več globinah s termočleni časovno spremljali naraščanje temperature. Poizkusi so trajali toliko časa dokler se notranjost preizkušanceca ni segrela na 60 °C.

Iz dobljenih rezultatov smo ugotovili, da imajo nezaščitene opažne plošče uravnovešene pri zračni vlažnosti 33% najmanjšo toplotno prevodnost. Pri višjih vlažnostih so opažne plošče zaščitene z melaminskim premazom izkazovale boljše izolativne lastnosti. Rezultati meritev so bili zelo variabilni, zato razlike statistično niso bile značilne.

7 VIRI

1. Balaskó Z. 2012. Izolacijski materiali iz lesnih vlaken in celuloze. Maribor: 57 str.
2. Fan M., Ohlmeyer, M., Irle M., Haelvoet, W. Rochesten, I. Athanassiadou, E. 2009. Performance in use and new products of wood based composites. London, Brunel University press: 578 str.
3. Geršak M., Velušček V. 2003. Sušenje lesa. Ljubljana, Zveza društev inženirjev in tehnikov lesarstva Slovenije, Lesarska založba: 153 str.
4. Goričanec D., Črepinšek – Lipuš L. 2008. Prenos toplote. Maribor: 86 str.
5. Gorišek Ž., Čop T., Mrak C., Geršak M., Velušček V. 1994. Sušenje lesa. Ljubljana, Zveza društev inženirjev in tehnikov lesarstva Slovenije, Lesarska založba: 26 – 45
6. Gorišek Ž. 2009. Les zgradba in lastnosti. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 178 str.
7. Koloini T. 1982. Prenos toplote in snovi. Ljubljana, Založba FKKT: 86 str.
8. Kollmann F., Cote W. 1993. Principles of Wood Science and Technology. Berlin, Springer: 590 str.
9. Siau J. 1984. Transport processes in wood. Berlin, Springer verlag: 244 str.

8 ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju prof. dr. Željku Gorišku ter recenzentu prof. dr. Alešu Stražetu za pomoč ter nasvete pri izvajanju diplomske naloge. Zahvaljujem se tudi vsem, ki so kakor koli zaslužni za izdelavo diplomske naloge.