

DOI: <https://doi.org/10.5592/CO/ZT.2021.14>

KOEFICIJENT TOPLINSKE PROVODLJIVOSTI TRADICIJSKE ZEMLJANE KUĆE IZ ISTOČNE HRVATSKE: STUDIJA SLUČAJA

THERMAL CONDUCTIVITY COEFFICIENT OF A TRADITIONAL EARTH HOUSE FROM EASTERN CROATIA: A CASE STUDY

Ana Perić¹, Ivan Kraus¹, Hrvoje Krstić²

(1) Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, Zavod za materijale i konstrukcije, Vladimira Preloga 3, Osijek, R. Hrvatska, aperic@gfos.hr; ikraus@gfos.hr

(2) Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, Zavod za organizaciju, tehnologiju i menadžment, Vladimira Preloga 3, Osijek, R. Hrvatska, hrvoje.krstic@gfos.hr

Sažetak

Iako je zemljana arhitektura mnogo zastupljena u istočnome dijelu Republike Hrvatske, većina je postojećih građevina u derutnome stanju i ne koristi se. Do danas nije provedeno istraživanje svojstava zemljanoga materijala za izradu zemljanih kuća te ne postoje norme prema kojima bi se nove građevine projektirale, a postojeće sanirale. Na području istočne Hrvatske autori su proveli opsežno terensko istraživanje u kojem su prikupljeni uzorci tradicijskih materijala iz više kuća izrađenih od nabijene zemlje. U ovome radu obrađene su djelomično samo dvije tradicijske zemljane mješavine prikupljene iz jedne kuće u Aljmašu te su određeni koeficijent toplinske provodljivosti, početna vlažnost, vlažnost nakon određivanja koeficijenta toplinske propusnosti i prostorna gustoća. Ovaj rad predstavlja jedan od prvih koraka u definiranju toplinskih svojstava tradicijskih mješavina korištenih za izradu zidova od nabijene zemlje.

Ključne riječi: nabijena zemlja, vlažnost, koeficijent toplinske provodljivosti, prostorna gustoća

Abstract

Even though earthen architecture is highly present in the eastern part of Republic of Croatia, most of the existing buildings are highly deteriorated and out of use. To date, no research has been conducted on the properties of earthen material used for construction of earthen houses or had any design and preservation acts been proclaimed. Authors have conducted extensive field research in Eastern Croatia, during which samples of traditional material were collected from rammed earth houses. In this study, two traditional earthen mixtures collected from houses in Aljmaš are presented, for which thermal conductivity coefficient, initial moisture content and moisture content after determining thermal conductivity coefficient, as well as bulk density, were

determined. This study represents one of the first steps in defining the thermal properties of traditional mixtures used for building rammed earth walls.

Keywords: rammed earth, moisture content, thermal conductivity coefficient, bulk density

1. Uvod

Iako je zemljana arhitektura u istočnoj Hrvatskoj bila izuzetno popularna u 19. i 20. stoljeću [1] – [3], danas je većina postojećih zemljanih kuća u derutnome stanju i uglavnom izvan uporabe. Ovo potvrđuju i terenska istraživanja koja su proveli autori. Do danas u Hrvatskoj nije provedeno istraživanje svojstava niti potresnoga ponašanja zemljane arhitekture. Osim toga, ne postoje norme za sanaciju niti izgradnju novih zemljanih konstrukcija. Međutim, valja napomenuti kako tehnike građenja zemljom posljednjih desetak godina postaju sve češći predmet istraživanja diljem Europe [4] – [7], ali i izvan Europe [8] – [11]. Među ostalim tehnikama građenja zemljom ističu se čerpič (engl. *adobe*), nabijena zemlja (reg. *naboj*, engl. *rammed earth*) i zemljani blokovi (engl. *compressed earth blocks*).

Predmet su ovoga istraživanja kuće čiji su nosivi zidovi izrađeni od nabijene zemlje. Terenskim istraživanjima koje su autori proveli u Slavoniji i Baranji primijećen je velik broj upravo takvih kuća. O njima pišu i Lončar-Vicković, Stober [1] i Živković [2], no ne daju pregled fizikalnih, mehaničkih ili toplinskih svojstava niti se osvrću na potresnu otpornost. Tradicionalno se zid od nabijene zemlje gradio nasipavanjem vlažnoga zemljanog materijala između drvene oplate koji se potom zbijao pomoću drvenoga nabijača [1]. Međutim, Bu i sur. [12] navode kako se u novije vrijeme drveni nabijači zamjenjuju pneumatskima. Debljina sloja zemlje smanji se nakon zbijanja uglavnom s otprilike 15 cm na otprilike 10 cm [12]. Takav se proces ponavlja dok se ne dostigne željena visina zida.

Središte ovoga rada jest istraživanje toplinskih svojstava tradicijskih zemljanih mješavina prikupljenih na terenu, zbog čega je pregledan bitan broj postojećih zemljanih kuća i gospodarskih objekata u istočnoj Slavoniji. Provedena su opsežna mjerenja, fotografiranje i prikupljanje uzoraka materijala, sve uz prisutnost i dopuštenje vlasnika objekata. Sakupljeni uzorci materijala ispitani su u laboratorijima na Građevinskome i arhitektonskome fakultetu Osijek. Rezultati prikazani u ovome radu dobiveni su na temelju ispitivanja dviju mješavina prikupljenih iz jedne kuće u Aljmašu.

2. Svojstva tradicijskih zemljanih mješavina

Iz zidova su, gdje je to bilo moguće i uz vlasnikovo dopuštenje, pažljivo izvađeni veći komadi nabijene zemlje koji su potom čuvani u zatvorenim plastičnim vrećicama u laboratorijskim uvjetima. Prikupljeni komadi zidova od nabijene zemlje bili su dovoljno veliki kako bi se iz njih izrezale prizme približnih dimenzija $100 \times 100 \times 37,5$ mm za određivanje koeficijenta toplinske provodljivosti (Slika 1).

Poznato je kako je koeficijent toplinske propusnosti u izravnoj vezi s prostornom gustoćom i udjelom vlažnosti. Stoga su preostali, uglavnom nepravilni veći dijelovi, nabijene zemlje nakon rezanja korišteni za određivanje prostorne gustoće i udjela vlažnosti u prikupljenome materijalu. Udio vlažnosti u materijalu određen je i nakon ispitivanja koeficijenta toplinske provodljivosti. Postupci određivanja spomenutih svojstava opisani su u narednim poglavljima.



Slika 1. Rezanje uzoraka iz velikih komada nabijene zemlje

2.1. Udio vlažnosti u materijalu i prostorna gustoća

Udio vlažnosti u materijalu određen je prema normi BS 1377-2:1990. Slijedeći postupak u navedenoj normi, određena je vlažnost odmah nakon prikupljanja materijala na terenu i nakon određivanja koeficijenta toplinske provodljivosti. U Tablici 1 w_0 odnosi se na udio vlažnosti određen isti dan kada je materijal prikupljen, tj. po povratku s terena, dok se w_λ odnosi na udio vlažnosti određen nakon ispitivanja koeficijenta toplinske propusnosti λ , nakon čega su prizme razmrvene kako bi bilo moguće precizno odrediti udio vlažnosti. Pregledom Tablice 1 moguće je uočiti kako dvije mješavine nemaju istu početnu vlažnost, iako su uzorci uzeti iz iste kuće, na isti dan i iako su čuvani u istim uvjetima. Vjerujemo kako su orijentacija konstrukcijskoga elementa (izloženost suncu ili položaj u sjeni), prostorna gustoća (zbijenost) materijala i visina uzorkovanja odgovorni za razliku u udjelu vlažnosti. Materijal mješavine A1 prikupljen je iz zida koji se nalazio u sjeni, dok je materijal mješavine A3 izvađen iz zida na osunčanoj strani kuće. Stoga se može očekivati da je udio vlažnosti mješavine A1 veći. Nadalje, uočeno je smanjenje udjela vlažnosti u prosjeku za oko 12 %. Za mješavinu A2 nije bilo moguće precizno odrediti svojstva promatrana u ovome radu.

Tablica 1. Početna vlažnost i vlažnost nakon određivanja koeficijenta toplinske propusnosti

Mješavina	w_0 (%)	w_λ (%)	Odstupanje, $(w_\lambda - w_0) / w_0$ (%)
A1	3,87	3,37	-12,92
A3	2,90	2,54	-12,41

Preliminarnim istraživanjem uočeno je kako uređaj za određivanje koeficijenta toplinske propusnosti utječe na vlažnost unutar uzorka jer se prilikom ispitivanja gornja i donja strana uzorka nejednoliko hlade, odnosno zagrijavaju. Osim toga, nakon provedenih ispitivanja radi određivanja koeficijenta toplinske propusnosti uočen je vodeni kondenzat uz rub otvora uređaja i na dijelovima gumenih podloga pomoću kojih se uzorak ugrađuje u uređaj. Ovo će biti dodatno istraženo. Nadalje, približno mjesec dana nakon prikupljanja materijala određena je prostorna gustoća (Tablica 2) na manjim uzorcima zemljanoga materijala prema normi BS 1377-2:1990 koja je u prosjeku iznosila $1,60 \text{ g/cm}^3$.

Tablica 2. Prostorna gustoća, ρ

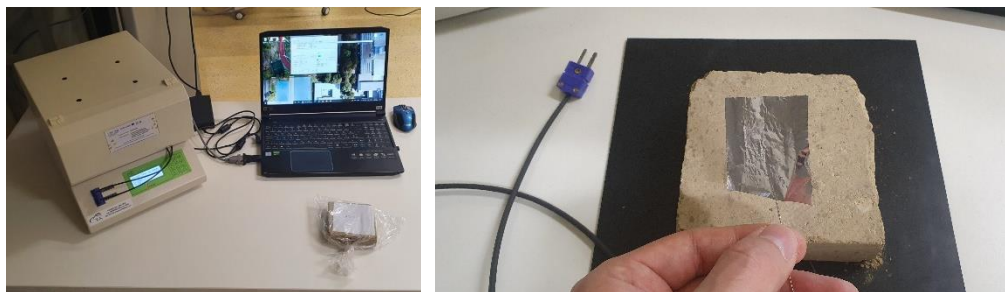
Mješavina	ρ (g/cm ³)
A1	1,50
A3	1,71
Srednja vrijednost	1,60

2.2. Koeficijent toplinske provodljivosti

Toplinska provodljivost λ (W/(mK)) svojstvo je građevnih materijala da provode toplinu, a definira se kao količina topline koja u jedinici vremena prođe kroz sloj materijala površine presjeka 1 m² i debljine 1 m okomito na njegovu površinu pri razlici temperature 1 K te se računa pomoću sljedećega izraza (1) [13]:

$$\lambda = \frac{Q}{A \cdot \Delta T} \cdot \frac{d}{t} \quad (1)$$

gdje je Q količina topline, A ploština, ΔT razlika temperature, d debljina materijala, a t vrijeme prolaza topline. Materijali s malom vrijednošću λ zovu se toplinski izolatori, a oni s velikom vrijednošću toplinske provodljivosti nazivaju se vodiči topline. Vrijednost toplinske provodljivosti λ vrlo je promjenjiva, čak i kod istoga materijala [13]. Ovisi o prostornoj gustoći, odnosno poroznosti, kemijskomu sastavu, sadržaju vlage te o temperaturi materijala. Zato govoriti o vrijednosti toplinske provodljivosti nekoga materijala ima smisla samo ako se preciziraju svi navedeni čimbenici [13]. Projektne vrijednosti toplinske provodljivosti nekih građevnih materijala moguće je pronaći u *Tehničkom propisu o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama* [14], gdje je za različite materijale, ovisno o njihovoj prostornoj gustoći, definirana ova vrijednost. Za određivanje toplinske provodljivosti nabijene zemlje izrađene su prizme tlocrtnih dimenzija 100 x 100 mm, pri čemu je srednja debljina 37,5 mm (Slika 2).



Slika 2. Uređaj (lijevo) i uzorak (desno) za ispitivanje koeficijenta toplinske provodljivosti

Prizme su ispitane u uređaju FOX 200 pomoću kojega se u tri ciklusa postižu različite temperature na gornjoj i donjoj plohi uzorka, pri čemu je razlika temperatura na gornjoj i donjoj plohi prizme stalna u sva tri ciklusa i iznosi 10 °C. Određeni koeficijenti toplinske provodljivosti za svaki ispitani uzorak λ_i prikazani su u Tablici 3. Rezultati se smatraju prihvatljivima jer najveće odstupanje među koeficijentima za istu mješavinu ne prelazi 10 %. Za potrebe definiranja svojstava materijala za praktične potrebe usvaja se najmanja vrijednost $\lambda_{\min}$ određena za jednu mješavinu. Osim toga, određena je i srednja vrijednost koeficijenta toplinske provodljivosti λ_m .

Tablica 3. Toplinska provodljivost određena na uzorcima nabijene zemlje

Mješavina	Uzorak	λ_i	λ_m	λ_{min}
		(W/(mK))		
A1	1	0,5211	0,5032	0,4896
	2	0,5084		
	3	0,4937		
	4	0,4896		
A3	1	0,7083	0,6736	0,6520
	2	0,6606		
	3	0,6520		

3. Zaključak

Za dvije tradicijske mješavine prikupljene iz kuće u Aljmašu određen je udio vlažnosti odmah po prikupljanju materijala te nakon ispitivanja koeficijenta toplinske provodljivosti. Svi su uzorci prije provođenja ispitivanja čuvani u zatvorenim plastičnim vrećicama u laboratoriju. Ispitivanje koeficijenta toplinske provodljivosti provedeno je otprilike mjesec dana nakon prikupljanja materijala na terenu. Udio vlažnosti u materijalu na terenu u prosjeku je iznosio 3,4 %. Nakon određivanja koeficijenta toplinske provodljivosti uočeno je smanjenje udjela vlažnosti za oko 12 %. Koeficijent toplinske provodljivosti određen je na prizmama tlocrtnih dimenzija 100 x 100 mm i prosječne debljine 37,5 mm te ima vrijednost između 0,49 i 0,65 W/(mK). Prostorna gustoća ispitanih uzoraka iznosila je u prosjeku 1,60 g/cm³. Daljnja istraživanja svojstava nabijene zemlje s područja Republike Hrvatske nužna su kako bi se omogućio razvoj normi i tehničkih propisa za projektiranje novih i sanaciju postojećih zemljanih konstrukcija, čime bi se spriječilo njihovo postupno propadanje i nestajanje.

Zahvale

Ovaj je rad sufinancirala Hrvatska zaklada za znanost projektom UIP-2020-02-7363, pod nazivom *Nabijena zemlja za modeliranje i normizaciju u potresno aktivnim područjima*, na čemu im zahvaljujemo. Mjerenja koeficijenta toplinske provodljivosti izvršena su u uređaju FOX 200, nabavljenomu u okviru projekta *Ozelenjavanje gradova – razvoj i promoviranje energetske učinkovitosti i održive urbane životne sredine u pograničnim gradovima između Hrvatske i Srbije*, HR-RS290, IPA Interreg. Zahvaljujemo vlasnicima kuće u Aljmašu koji su dopustili prikupljanje uzoraka za potrebe ispitivanja i laborantu Daliboru Ercegu na pomoći oko pripreme uzoraka za ispitivanje.

Literatura

- [1] Lončar-Vicković S., Stober D.: Tradicijska kuća Slavonije i Baranje, Ministarstvo turizma Republike Hrvatske, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski fakultet Osijek, str. (1-116), 2011.
- [2] Živković Z., Hrvatsko tradicijsko graditeljstvo, Ministarstvo kulture, Uprava za zaštitu kulturne baštine, 2013.
- [3] Perić A, Potresno ponašanje zidova tradicijskih kuća od nabijene zemlje, Josip Juraj Strossmayer Osijek, 2020.

- [4] Gomes M. I., Gonçalves D., Faria P., Ustabilized rammed earth: Characterization of material collected from old constructions in south Portugal and comparison to normative requirements, *Int. J. Archit. Herit.*, vol. 8, no., pp. 185-212, 2014., DOI: 10.1080/15583058.2012.683133
- [5] Bui Q. B., Bui T. T., Limam A., Morel J. C., Discrete element modeling of rammed earth wall, *Rammed Earth Construction – Proceedings of the 1st International Conference on Rammed Earth Construction, ICREC 2015*, pp. 57-61, 2015.,
- [6] Serrano S., Rincón L., González B., Navarro A., Bosch M., Cabeza L. F., Rammed earth walls in Mediterranean climate: Material characterization and thermal behaviour, *Int. J. Low-Carbon Technol.*, vol. 12, no. 3, pp. 281-288, 2017., DOI: 10.1093/ijlct/ctw022
- [7] Jaquin P. A., Augarde C. E., Gallipoli D., Toll D. G., The strength of unstabilised rammed earth materials, *Geotechnique*, vol. 59, no. 5, pp. 487-490, 2009., DOI: 10.1680/geot.2007.00129
- [8] Ciancio D., Gibbings J., Experimental investigation on the compressive strength of cement-stabilised rammed earth samples, *Constr. Build. Mater.*, vol. 28, no. 1, pp. 294-304, 2012., DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.08.070
- [9] Ciancio D., Beckett C. T. S., Carraro J. A. H., Optimum lime content identification for lime-stabilised rammed earth, *Constr. Build. Mater.*, vol. 53, pp. 59-65, 2014. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.11.077
- [10] Shrestha K. C., Aoki T., Miyamoto M., Wangmo P., Pema, In-plane shear resistance between the rammed earth blocks with simple interventions: Experimentation and finite element study, *Buildings*, vol. 10, no. 3, 2020., DOI: 10.3390/buildings10030057
- [11] Lin H., Zheng S., Lourenço S. D. N., Jaquin P., Characterization of coarse soils derived from igneous rocks for rammed earth, *Eng. Geol.*, vol. 228, pp. 137-145, 2017., DOI: 10.1016/j.enggeo.2017.08.003
- [12] Bui Q. B., Morel J. C., Hans S., Meunier N., Compression behaviour of non-industrial materials in civil engineering by three scale experiments: The case of rammed earth, *Mater. Struct. Constr.*, vol. 42, no. 8, pp. 1101-1116, 2009., DOI: 10.1617/s11527-008-9446-y
- [13] Galović A., *Termodinamika II*, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2003.
- [14] Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama (Translation: Technical Regulation on the Rational Use of Energy and Thermal Insulation in Buildings). *Narodne novine*, broj 128/15, 70/18, 73/18, 86/18, 102/20