

## SLAMA KAO GRAĐEVNI MATERIJAL

U posljednje vrijeme pozivanje na ekologiju i održivost postaje neizbježno u svim aspektima življenja. U tom

kuća od slame može znatno pridonijeti i smanjenju emisija stakleničkih plinova. Naime, više od 50 posto

zuzu da je zid ispunjen balama slame mnogo otporniji na požar, nego zid drvenog postolja uz jednake završne slojeve [2].



Slika 1. Obiteljska kuća u okolici Beča sa zidovima od slame

su smislu vrlo važna tema energijski i ekološki održivi materijali koji služe za gradnju zgrada, a jedan od takvih materijala je i slama. Upotrebom slame kao građevnog materijala smanjuje se uporaba drugih građevnih materijala koji nepovoljno utječu na okoliš, a kad dotraje građevina slama se može kompostirati.

Prednosti slame kao građevnog materijala su brojne. Slama ima dobru toplinsku i akustičnu izolaciju, a njezini građevni proizvodi otporni su na požar, imaju relativno dobru čvrstoću, otporni su prema nametnicima. Slama je vrlo jednostavna za oblikovanje te dostupna po niskoj cijeni kao sirovina.

Posebno je zanimljivo da se zidovima od slame može vrlo lako postići kriterij pasivne kuće (1 l loživog ulja/m<sup>2</sup>), što je karakteristika vrlo dobro izolirane kuće. Zbog manjih potreba za grijanjem i hlađenjem,

svih stakleničkih plinova nastaje u graditeljstvu i transportu vezanom uz graditeljstvo. Stoga izazov projektiranja 21. stoljeća postaje poboljšanje energijske učinkovitosti kuća. Primjer kuća izgrađenih od slame dan je na slici 1.

Ključni pojam za razumijevanje slame kao građevnog materijala jest novi koncept izgradnje tzv. *faktor 10* po kojem se znatno smanjuje energija za izvedbu građevina (tzv. primarna energija), zatim energija tijekom eksploatacije te građevine i to deset puta, odnosno kuće od slame troše deset puta manje energije u odnosu prema tradicijskoj izgradnji [1]. Kuća s *faktorom 10* već od izgradnje deset puta smanjuje zagađenje za razliku od onih standardnih.

Ožbukani su zidovi od slame otporniji na požar nego tradicionalni zidovi drvene konstrukcije. Rezultati ASTM testova na požarnu otpornost doka-

Iako se slama u Hrvatskoj danas smatra otpadom, može biti vrlo jeftin građevni materijal. Isporučena bala slame s polja stoji u prosjeku samo 1 ili 0,5 eura, dok zidovi obiteljske dvokatne kuće od otprilike 150 m<sup>2</sup> stoje samo otprilike 900 eura, što je zaista malo u usporedbi s cijenom zidova od opeke i blokova koji stoje otprilike 15000 eura. Budući da je način gradnje kuće od slame tako jasan, u projektiranju i gradnji mogu sudjelovati ljudi bez prethodnog iskustva, štedeći tako na troškovima rada.



Slika 2. Kuća sa slamnatim zidovima u gradnji

### Raspoloživost slame

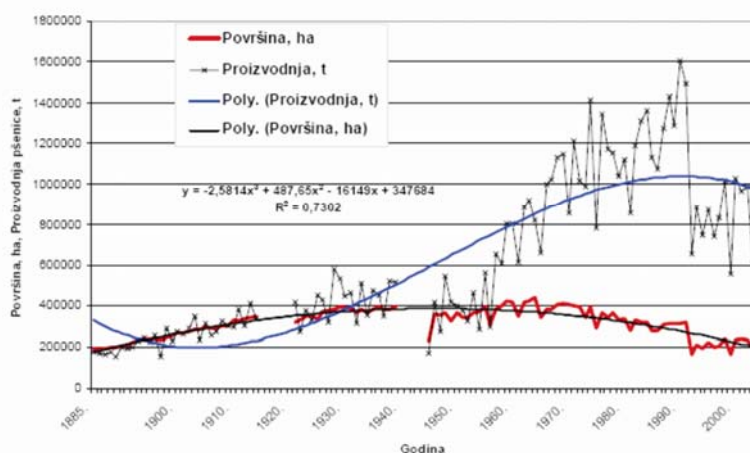
U tablici 1. [3] vide se žetvene površine pojedinih kultura i ukupna proizvodnja (u tonama) pojedinih žitarica.

Na slici 3. dijagramski je prikazana površina zasijana pšenicom u Hrvatskoj od 1885. do 2003. godine.

Tablica 1. Jesenska sjetva, stanje 15. prosinca 2006. [3]

Naziv kulture	Žetvena površina, ha	Ukupna proizvodnja, t
Pšenica	146.253	601.748
Ječam	50.341	162.530
Raž	1.848	739
Zob	21.185	49.470
<b>Ukupno</b>	<b>219.627</b>	<b>814.487</b>

Površina i pšenice u Hrvatskoj, 1885-2003.



Slika 3. Dijagram površine zasijane pšenicom i proizvodnja pšenice u razdoblju od 1885. do 2003.

U prosjeku se može računati da pri intenzivnom uzgoju strnih žitarica ostaje 4 do 5 tona slame po hektaru, što ovisi o godini i sorti (uglavnom je omjer između prinosa zrna i uroda slame 50:50 posto) [4].

Općenito se jedna trećina slame upotrebljava kao stelja za stoku, trećina se podorava, a trećina je na raspolaganju za građevni materijal. Kao ilu-

stracija raspoloživosti slame kao građevnog materijala mogu se uzeti u obzir područja sjeverne i južne Austrije te Burgenlanda koja imaju ukupnu proizvodnju od 400000 t slame. Iskorištavanjem samo 50 posto te proizvodnje moglo bi se izgraditi više od 20000 kuća površine 150 m<sup>2</sup> na godinu, što je velika iskoristivost. Hrvatska ima na raspolaganju otpri-

like 270000 t slame za izgradnju, a to bi moglo biti dostatno za izgradnju 13500 prosječnih obiteljskih kuća na godinu.

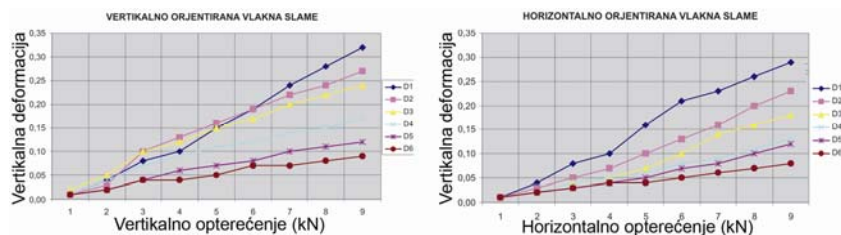
Daljnji razvoj uporabe slame kao građevnoga materijala orijentiran je prema izradi elemenata koji su mnogo prikladniji za primjenu u graditeljstvu. U tom su smislu razvijeni građevni elementi od prešane slame, najčešće kao ploče različitih dimenzija (slika 4.) te tzv. CP blokovi [5]. Upravo ti novi građevni materijali područje su razvoja u koje se uključio i Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije.

### Čvrstoća slame

Različite vrste slame imaju različite kemijske sastave i svojstvene čvrstoće. Međutim, mikrosvojstva slame manje su važna od makrosvojstva bale. Prema iskustvu i nekim laboratorijskim ispitivanjima, sadržaj vlage, gustoća i povijest (povijest skladištenja bale i zaštita od žetve do gradnje) primarni su odlučujući faktori koji utječu na kvalitetu bale [6]. Sadržaj vlage ovisi o uvjetima u vrijeme baliranja i prilikom kasnijeg skladištenja i transporta. Kontrola kvalitete i ispitivanje bale slame zahtijeva upotrebu vlagomjera. Gustoća bale ovisi o vrsti žitarica, sadržaju vlage i stupnju kompresije balirke, ali općenito bi trebala iznositi najmanje 1,1 kN/m<sup>3</sup> (suha gustoća je gustoća kojoj je proračunata i oduzeta masa vlage) ako se namjerava rabiti kao nosivi element. Veličina bale varira ovisno o balirkama koje se upotrebljavaju lokalno iako je standard za trižičane bale 584 x 1168 x 406 mm (dvožičane bale su puno manje). Prema različitim laboratorijskim ispitivanjima slamnate bale ustanovljen je modul elastičnosti 1379 kPa (ovisno o gustoći i vlazi) i tlačno naprezanje od 482,7 kPa. Neožbukani zidovi visine 2438 mm prema ispitivanjima na tlak izdržali su (prije izvijanja zida) tlačna naprezanja od 27,6 do 34,5 kPa. Na slici 5.



Slika 4. CP blokovi s prikazom njihove ugradnje



- |           |                                   |           |                                   |
|-----------|-----------------------------------|-----------|-----------------------------------|
| <b>D1</b> | <b>81 - 90 kg/m<sup>3</sup></b>   | <b>D4</b> | <b>111 - 120 kg/m<sup>3</sup></b> |
| <b>D2</b> | <b>91 - 100 kg/m<sup>3</sup></b>  | <b>D5</b> | <b>121 - 130 kg/m<sup>3</sup></b> |
| <b>D3</b> | <b>101 - 110 kg/m<sup>3</sup></b> | <b>D6</b> | <b>131 - 140 kg/m<sup>3</sup></b> |

Slika 5. Utjecaj različitih gustoća bala slame na deformaciju pri vertikalno i horizontalno orijentiranim vlaknima slame

prikazan je odnos gustoće i otpornosti na deformaciju (*stress*) za horizontalnu i vertikalnu orijentaciju vlakana od slame.

Dok se ne donesu propisi izgradnje koji se odnose na baliranu slamu, stvarna kvaliteta specifičnih bala odabranih za određeni projekt mora se odrediti na osnovi pažljivog projektiranja i ispitivanja. Stoga specifikacije poput najvećeg dopuštenog sadržaja vlage u vrijeme izgradnje i najmanje gustoće moraju biti izražene kao kriterij izvedbe.

### Toplinska izolacija

#### Visoki stupanj izolacije

Slama osigurava odličnu izolaciju po prihvatljivoj cijeni. Koeficijent je toplinske vodljivosti u bali slame 0,09 W/mK. Ta vrijednost kombinirana sa zidovima debljine iznad 450 mm debljine daje koeficijent prijelaza topline 0,13 W/m<sup>2</sup>K, što je dva do tri puta manje od današnjih materijala i puno niže nego što zahtijeva trenutno važeća regulativa u graditeljstvu, prema kojoj vrijednost koeficijenta

prijelaza topline treba iznositi 0,45 W/m<sup>2</sup>K ili manje.

U tablici 2. vidljiva je usporedba potrošnje toplinske energije za različite tipove kuća. Potrošnja toplinske energije za kuće od slame čak je 33 puta manja od potrošnje te energije za tradicionalne zgrade, odnosno oko 15 puta manja od potrošnje energije po novom hrvatskom standardu i 2,5 puta manja od pasivnog standarda.

#### Testovi vodljivosti

Koeficijent toplinske vodljivosti,  $\lambda$ , opisan je numeričkom vrijednosti koja ovisi o materijalu. Za dijelove zgrade kao što su zid i krov prikladniji je koeficijent prijelaza topline (U). Prema ispitivanjima toplinske izolacije okomito postavljenih bala slame (kao što se rabe u drvenom postolju u graditeljstvu) vrijednost  $\lambda$  je 0,045 W/mK [6].

Spomenuti rezultati ispitivanja rađeni su prema američkim normama i ne podudaraju se s europskim normama pa se stoga ne mogu upotrebljavati u Europi. U projektu *Sustavi*

zidova napravljeni od obnovljivih izvora izvršena su ispitivanja bala slame pšenice različitih gustoća. Ispitivanja toplinske izolacije proveo je *Odjel općine 39* (Beč) prema ISO 8301 i ÖNORM B6015 dio I., [7]. Mjerenjem prema ISO 8301 dobiven je rezultat  $\lambda_{10} = 0,0369$ , odnosno 0,0337 W/mK (suhi materijal pri 10°C), dok je mjerenjem prema ÖNORM B6015 dobivena vrijednost  $\lambda_{10} = 0,0380$  W/mK. Prema europskoj normi, referentna vrijednost treba biti izračunana  $\lambda$  vrijednost koja uključuje 20 posto dodatka vlage. Stoga je referentna vrijednost toplinske vodljivosti pšenične bale slame gustoće 100 kg/m<sup>3</sup>  $\lambda = 0,0456$  W/mK. Time je toplinska vodljivost slame u rasponu s ostalim izolacijskim materijalima koji su prirodni (lan, konoplja, vuna, pluto, celuloza). Posebno je interesantno da tako niski koeficijenti toplinske vodljivosti slame omogućava lako postizanje pasivnog standarda, odnosno izgradnju pasivnih kuća.

#### Koeficijent prijelaza topline

Zbog niske provodljivosti slame zidovi od bala slame ukupne debljine 42 cm imaju koeficijent prijelaza topline  $U = 0,12$  W/m<sup>2</sup>K. Zajedno s drvenom konstrukcijom koeficijent U je otprilike 0,14 W/m<sup>2</sup>K. To znači da zgrada sa zidovima od slame koja ima drvene nosače ili stupove ima vrijednost U ispod 0,15 W/m<sup>2</sup>K te odgovara kriterijima pasivne kuće.

#### Uporaba zeolita kao dodatka žbuci

Čovjek u prosjeku 90 posto svog životnog vijeka provede u zatvorenom

Tablica 2. Potrošnja toplinske energije različitih tipova kuća

150 m <sup>2</sup>	200 kWh/m <sup>2</sup> a	100 kWh/m <sup>2</sup> a	15 kWh/m <sup>2</sup> a	6 kWh/m <sup>2</sup> a
Godine	Skladište	Nova građevina	Pasivna kuća	Kuća od slame
1	30.000	15.000	2.250	900
10	300.000	150.000	22.500	9.000
20	600.000	300.000	45.000	18.000

prostoru. U prostorijama se, zahvaljujući sve boljim izolacijama građevine, pojavljuju rizici za zdravlje jer se stvara povišena koncentracije štetnih tvari. U zraku koji čovjek svakodnevno udiše prisutan je čitav spektar štetnih kemikalija koje zagađuju građevinu, a koje oslobađaju ne samo građevni materijali rabljen u izgradnji građevine, već i namještaj, kozmetika, odjeća, dječje igračke, kuhinjsko posuđe. Naravno tu treba pridodati i problematiku prisutnosti radona u zgradama. Sve te štetne tvari djeluju kumulativno.

Da bi se smanjili rizici oboljenja ljudi bi trebali živjeti u zdravom prostoru, odnosno izboriti se za postizanje najviših standarda zdravog stanovanja.

Slama, osobito organski uzgojena, zdrava je alternativa modernim materijalima. Prirodna je i bez štetnih emisija, a ožbukana ilovačom uz dodatak aditiva – zeolita, ima ulogu poboljšavanja kvalitete zraka koji udišemo. Zeoliti su prirodna sita. Čak 90 posto stijena koje čine Zemljinu koru sačinjavaju zeolitni tufovi. Razlikuju se prirodni i sintetski zeoliti, svaki od njih ima svoje prednosti i nedostatke [8, 9].

Prirodni zeoliti su dostupni i ekonomski prihvatljivi. Zeoliti su hidratizirani aluminosilikati s otvorenom trodimenzionalnom kristalnom strukturom, načinjenom od međusobno povezanih aluminijevih, silicijevih i kisikovih atoma u čijim se porama najčešće nalaze natrijevi, kalijeви, kalcijeви i magnezijeви ioni okruženi molekulama vode. Zagrijavanjem zeolita dolazi do dehidratacije vode, tj. voda izlazi iz zeolitne strukture i omogućena je sorpcija drugih molekula ovisno o njihovoj veličini. Negativno nabijena površina zeolita selektivno privlači, apsorbira ili adsorbira pozitivne ione. Aktivacija zeolita može se postići djelovanjem temperature ili modifikacijama površine zeolita ovisno o primjeni. Zbog svojih ionozmjenjivačkih, adsorpcijskih i

katalitičkih svojstava, upotreba zeolita ima široku primjenu u sorpciji plinova, teških metala, pesticida, fungicida kao i metaboličku aktivnost u kontaktu s mikroorganizmima. Zeoliti mogu također biti korisni i u regulaciji vlage zbog svojih hidratacijskih-dehidratacijskih svojstava.

Žbuku – glinu s biovlaknima obogaćenu aditivom – zeolitom moguće je rabiti kako bi se dodatno ubrzala razgradnja štetnih tvari, koje su:

- dim cigareta (oslobođeni formaldehid, acetaldehid i octena kiselina)
- mirisi oslobođene iz tepiha i madraca
- miris ribe (trietilamin)
- miris fekalija (amonijak)
- formaldehid (namještaj, boje, sredstva za čišćenje i slično)
- benzol (ispušni plinovi automobila, boje, lakovi i slično)
- aromatski ugljikovodici (otopine, tiskarski proizvodi, goriva, sredstva za čišćenje i slično)
- klor-ugljikovodici (sredstva za čišćenje tekstila, plinovi, sredstva za čišćenje).

Ovi učinci uvijek dolaze zajedno, pa je zbog toga upotreba zeolita moguća na tako puno područja primjene.

Uporabom završnih slojeva poput ilovače obogaćene aditivima na bazi zeolita, primjenom prirodnih pigmenta i boja te prozračivanjem može se postići jedna od najsigurnijih i najugodnijih atmosfera za stanovanje, poboljšati zrak unutarnjih pros-

torija bez ikakvih štetnih popratnih pojava na one koji borave u takvim prostorijama.

### Troškovi

Prema gruboj procjeni troškova različitih izolacijskih materijala, uporaba slame kao izolatora velika je mogućnost za smanjivanja troškova. U tablici 3. prikazane su vrijednosti koeficijenta toplinske vodljivosti ( $\lambda$ ) dobivene proračunom. Debljina zida koja odgovara koeficijentu prijelaza topline,  $U = 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ , dana je u trećem stupcu, a u četvrtom je konkretna cijena u eurima za područje Austrije. U posljednjem stupcu prikazane su cijene različitih izolacijskih materijala za prosječnu kuću od  $150 \text{ m}^2$  (cijene uključuju 20 posto poreza).

### Zaključak

Slama se pokazuje kao odličan građevni materijal. Njezinom se uporabom u graditeljstvu može znatno uštedjeti energija potrebna za grijanje i hlađenje prostora te smanjiti emisije stakleničkih plinova. Zidovi od slame imaju i dobru statičku čvrstoću, otporni su na požar i osiguravaju dobru zaštitu od buke. Uporabom zeolita kao aditiva u žbuci, kojom se žbukaju zidovi od slame, stvara se potpuni okvir za zdravo stanovanje.

Posebno je važna činjenica da se gradnjom kuća od slame potrebna energija za izgradnju i eksploataciju takvih građevina smanjuje čak deset puta, a cijene su kuća građenih od slame znatno niže od cijena tradicijski građenih kuća.

Tablica 3. Vrijednosti koeficijenta toplinske vodljivosti ( $\lambda$ ) dobivene proračunom (GrAT – Center for Appropriate Technology, Vienna University of Technology)

Materijal	$\lambda$ [W/mK]	Debljina [cm]	Cijena [EUR/m <sup>2</sup> ]	Cijena za kuću od 150 m <sup>2</sup> [EUR]
Bala slame	0,045	30	3,63	1453
Celuloza	0,045	30	18,31	7325
Ekspandirani polistiren	0,038	24	20,35	8139
Kamena vuna	0,038	24	23,55	9418

## LITERATURA

- [1] Wimmer, R.; Hohensinner, H.; Drack, M.; Beitel A. M.: *Planen und bauen für die Zukunft: Das S-House*, Impulsprogramm "Nachhaltig Wirtschaften". Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, und Gruppe Angepaste Technologie (GrAT), Technische Universität Wien, 2005.
- [2] Taha H. M. A. A.: *The use of renewable agricultural by-Products as building materials*, Faculty of agriculture, Mosh-tohor Zagazig University Benha Branch Fachverband Strohballenbau Deutschland e.V., 2003.
- [3] Poljoprivreda, lov, šumarstvo; Poljoprivredna površina po kategorijama: Statistički ljetopis 2006., Državni zavod za statistiku Republike Hrvatske
- [4] Medimurec, T.: *Prašenje strništa*, Hrvatski zavod za poljoprivrednu savjetodavnu službu, <http://www.hzps.hr/?page=savjeti.13.115>
- [5] Abbott, B.; Frickel, M.; Hall D.; Shuster K.; Yellin P.: *Waste Today, Wall Tomorrow: Assessment of an Innovative Straw Block for Residential Construction*, [http://www.bren.ucsb.edu/research/documents/Straw\\_poster.pdf](http://www.bren.ucsb.edu/research/documents/Straw_poster.pdf)
- [6] McCabe, J. (1993): *Thermal Resistivity of Straw Bales for Construction* (Master thesis), University of Arizona, Tucson.
- [7] OENORM B 6015-1: 2003-06-01. Determination of the thermal conductivity by the guarded hot plate apparatus - Part 1: Test procedure and evaluation of results <http://www.beuth.de/langanzeige/OENORM+B+6015-1/65473518.html>
- [8] Database of zeolite structures, <http://www.iza-structure.org/databases/>
- [9] The mineral clinoptilolite <http://www.galleries.com/minerals/SILICATE/clinopti/clinopti.htm>

Zvonimir Glasnović,  
Mladen Sesartić,  
Karmen Margeta