



## ŠIAUDŲ NAUDOJIMO GALIMYBIŲ TERMOIZOLIACINIŲ MEDŽIAGŲ GAMYBAI TYRIMAI

Jolanta Vėjelienė<sup>1</sup>, Albinas Gailius<sup>2</sup>, Sigitas Vėjelis<sup>3</sup>

Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva  
El. paštas:<sup>1</sup> jolanta.vejeliene@vgtu.lt; <sup>2</sup> albinas.gailius@yahoo.com; <sup>3</sup> sigitas.vejelis@termo.vgtu.lt

Įteikta 2010 03 02; priimta 2010 03 22

**Santrauka.** Vienas esminių statinio reikalavimų – energijos taupymas ir šilumos išsaugojimas. Apytiksliai 40 % visos Europos Sąjungoje suvartojamos energijos tenka šildomų pastatų eksploatacijai. Didžiąją šių sąnaudų dalį sudaro energija, suvartojama pastatams šildyti šaltuoju metų laikotarpiu ir jiems vėsinti šiltuoju metų laikotarpiu. Kelis kartus mažiau energijos galima suvartoti gaminant termoizoliacines medžiagas iš atsinaujinančiųjų išteklių ir jomis šiltinant pastatus. Tokių medžiagų šilumos laidumo koeficientas yra apytiksliai 0,040 W/(mK). Darbe nagrinėjamos šiaudų naudojimo galimybės termoizoliacinių medžiagų gamybai. Pateikti atliktų įvairaus tankio šiaudų šilumos laidumo tyrimų laboratorinėmis sąlygomis ir vakuumuotoje aplinkoje rezultatai.

**Reikšminiai žodžiai:** vakuuminės termoizoliacinės medžiagos, šilumos laidumas, atsinaujinantieji ištekliai, šiaudai, energinis naudingumas.

### 1. Įvadas

Viena svarbiausių priemonių energetinei priklausomybei ir išmetamųjų šiltnamio efektą sukeliančių dujų kiekiui mažinti yra suvartojamos energijos kiekio mažinimas ir energijos iš atsinaujinančiųjų išteklių vartojimas. Vartojant mažiau energijos ir naudojant daugiau atsinaujinančiųjų išteklių, didėja energijos tiekimo sauga, skatinama technologijų plėtra, didinamas užimtumas bei regioninė plėtra, ypač kaimo vietovėse (Europos Parlamentas 2009). Europos Vadovų Taryba patvirtino ES tikslą – iki 2020 m. sumažinti išmetamų šiltnamio efektą sukeliančių dujų kiekį 20 %, palyginti su 1990 m., ir užtikrinti, kad pasaulyje temperatūra pakiltų mažiau nei 2 °C. Šiam tikslui pasiekti būtina didinti energijos vartojimo efektyvumą Bendrijoje.

2005 m. Lietuvoje įsigaliojo statybos techninis reglamentas (STR 2.01.09:2005), kuriame nustatyti pastatų energinio naudingumo sertifikavimo reikalavimai. Pagrindinė šio reglamento nuostata – efektyvus energijos išteklių naudojimas. Šiuo metu pastatų eksploatacijai suvartojama daugiau nei 40 % bendrų energijos išteklių visoje Europos Sąjungoje (Mickaitytė *et al.* 2008; European Union 2010). Didžioji dalis energijos ište-

klių suvartojama pastatams šildyti šaltuoju metų laikotarpiu ir jiems vėsinti šiltuoju metų laikotarpiu.

Nuo 2020 m. visi statomi pastatai turės atitikti aukštus energijos taupymo standartus, o didžiąją dalį energijos „pasigaminti“ iš alternatyvių energijos šaltinių (Europos Parlamentas 2009).

Išskiriamas CO<sub>2</sub> kiekis, o kartu ir energijos sąnaudas galima gerokai sumažinti naudojant efektyvesnę pastatų atitvarų šiluminę izoliaciją. Mažai energijos vartojantys ir pasyvūs pastatai Vokietijoje šiuos teiginius jau patvirtino. Mažai energijos vartojantiems pastatams reikia mažiau nei 60 kWh/(m<sup>2</sup> metams), o pasyviems pastatams – apie 15 kWh/(m<sup>2</sup> metams) (Beck *et al.* 2004). Nuostoliams sumažinti gyvenamųjų pastatų atitvarų šilumos izoliacijos sluoksnis siekia 30 cm ir daugiau. Įrengti tokį termoizoliacinės medžiagos sluoksnį be šiluminių tiltelių praktiškai neįmanoma. Pagal statybos techninio reglamento STR 2.01.09:2005 3 priede pateiktus nurodymus medžiagos šilumos laidumo koeficientas gali padidėti daugiau nei du kartus dėl šilumos nuostolių per šiluminius tiltelius. Be to, gaminant šiuolaikines termoizoliacines medžiagas – mineralinę vatą, putplasčius – suvartojami dideli energijos kiekiai.

Gaminant termoizoliacines medžiagas iš atsinaujinančiųjų išteklių – smulkinto popieriaus, linų, kamštienos, nendrių ir kt. – suvartojama kelis kartus mažiau energijos. Tokių medžiagų šilumos laidumo koeficientas yra apytiksliai 0,040 W/(mK) (Beck *et al.* 2004).

Dėl mažos kainos daugiausia dėmesio, gaminant termoizoliacines medžiagas iš atsinaujinančiųjų išteklių, skiriama kviečių, avižų, miežių, ryžių ar miskantų šiaudams. Iš šių augalų Lietuvoje neauginami tik ryžiai. Kiekvienais metais dideli kiekiai šių augalų šiaudų tiesiog susmulkinami arba kompostuojami (Arlauskienė *et al.* 2009; Ahn *et al.* 2009).

Šio darbo tikslas – ištirti termoizoliacinių medžiagų iš atsinaujinančiųjų išteklių – šiaudų – šilumos laidumo koeficientą ir šiaudų naudojimo galimybes vakuuminėse termoizoliacinių medžiagų gamybai.

## 2. Šiaudai ir jų naudojimas

Šiaudai – sausi išskultų javų (rugių, kviečių, miežių, avižų ir kt.) stiebai. Šiaudų sudėtis yra tokia: celiuliozė – 35–45 %, neazotinė ekstrakcinė medžiaga – 38–39 %, baltymai – 2–6 %, riebalai – 1,2–2,0 %, mineralinės medžiagos – 3–8 %, vanduo – 15 %. Šiaudai gali būti naudojami palaidi, palaidi ir smulkinti, presuoti, surišti arba kaip kitų statybinių medžiagų sudedamoji dalis.

Šiaudus kaip statybinę medžiagą žmonės pradėjo naudoti seniai, kai tik pradėjo statyti būstus. Tai labai patvari, lanksti, gerų termoizoliacinių savybių medžiaga. Be to, tai vietinė atsinaujinančioji medžiaga. Nesurišti į ryšulius šiaudai naudojami ir šiais laikais stogų, sienų ar grindų konstrukcijoms. Statant namą iš molio ar plūkiant aslą, šiaudai dedami kaip armuojamieji priedai ir kaip termoizoliacinė medžiaga.

Namų iš presuotų šiaudų ryšulių statybos pradžia siejama su presavimo mašinos išradimu. XIX a. pabaigoje naujakuriai, atsikėlę gyventi į Šiaurės Amerikos žemyno stepių teritoriją (dabartinėje Nebraskos valstijoje), susidūrė su aktualia problema – šiose vietovėse trūko medienos ir kitų statybinių medžiagų būstui statyti. Gamtinės sąlygos buvo palankios grūdiniams kultūroms auginti ir šiaudams gaminti.

Šis laikotarpis sutapo su naujų technologijų paieškomis. XIX a. pabaigoje Jungtinėse Valstijose atsirado pirmosios presavimo mašinos, o neilgai trukus Nebraskoje iš šiaudų blokų, tarsi iš labai didelių plytų, pradėti statyti pirmieji pastatai, dvarai ir kt.

Pirmieji pastatai dėl medienos trūkumo buvo statomi be karkaso. Ši statybos technologija plačiai taikyta iki 1930 m. Vienas iš tokių namų, pastatytas 1903 m. Nebraskoje, yra išlikęs iki mūsų dienų ir iki šiol naudojamas pagal paskirtį.

Tuo laikotarpiu iš presuotų šiaudų ryšulių buvo statomi įvairios paskirties pastatai: gyvenamieji namai, parodotuvės, mokyklos, dvarai, taip pat žemės ūkio paskirties pastatai – tvartai, sandėliuoti skirti statiniai.

Nuo 1940 m. tokia statyba sustojo. Taip įvyko dėl sparčiai augančios statybinių medžiagų ir chemijos pramonės. 8-ojo dešimtmečio pradžioje susibūrę bendraminčiai nutarė siekti bendro tikslo – grįžti prie tradicinės ekologiškos ir pigios statybos technologijos.

Dabartiniu metu iš šiaudų dažnai gaminami presuoti blokai arba plokštės (Gailius, Vėjelis 2009). Panašias plokštes galima gaminti ir iš šieno ar įvairių žolių, rapso sėklų, linų atliekų, cukrašvendrių atliekų, palmių, vandens hiacintų, bambuko, riešutų lukštų, saulėgrąžų lukštų, ryžių šiaudų, manijoko (*Cassava*), medienos ar medienos atliekų.

Šiaudai šilumos izoliacijai naudojami daugiau kaip 100 metų, tačiau jų savybės labai mažai ištirtos. Pagrindinė šių tyrimų stoka priežastis – labai skirtingas šiaudų tankis. Skirtinguose literatūros šaltiniuose nurodytas šiaudų tankis kinta nuo 15 kg/m<sup>3</sup> iki 400 kg/m<sup>3</sup> (McCabe, 1993; Andersen, Munch-Andersen 2001; Kazragis, 2005; Commins 1998). Esant tokiam tankiui, šiaudų šilumos laidumo koeficientas kinta nuo 0,035 W/(mK) iki 0,130 W/(mK) (Beck *et al.* 2004; Gailius, Vėjelis 2009). Tačiau atskiruose literatūros šaltiniuose nurodytus tyrimų rezultatus sudėtinga lyginti, nes bandymai atlikti skirtingomis temperatūros ir drėgnio sąlygomis. Taip pat gali būti skirtingos augalų augimo ir šiaudų gaminimo sąlygos.

## 3. Bandymų metodika

Bandymams naudoti miežių šiaudai, kurių tankis kito nuo 50 kg/m<sup>3</sup> iki 140 kg/m<sup>3</sup>. Šiaudų stiebelių skersmuo buvo nuo 1 mm iki 5 mm. Ši medžiaga pasirinkta dėl geros jos struktūros: smulkios poros, horizontaliai paruoštų šiaudų yra mažas šilumos laidis dėl konvekcijos. Horizontaliai orientuoti šiaudai buvo sudėti į iš anksto paruoštus metalizuotus maišus (1 pav.).

Metalizuoti maišai pagaminti iš daugiasluoksnės plėvelės, kurios vidinis sluoksnis padarytas iš polietileno. Vidiniai plėvelės paviršiai kraštuose buvo užlydomi.

Bandymai atlikti dviem etapais. Pirmame etape išmatuoti orasausių šiaudų šilumos laidumo koeficientai normaliomis laboratorinėmis sąlygomis, esant vidutinei bandinio temperatūrai 10 °C (2 pav.).

Antrame etape šiaudai užsandarinti į dujoms nelaidžią plėvelę, kurioje įmontuotas ventilis. Oras iš bandinių per ventilių buvo išsiurbtas prijungtu vakuuminio siurbliu (3 pav.).



1 pav. Horizontaliai orientuoti šiaudai sudėti į metalizuotus maišus

Fig. 1. Horizontally oriented straw in metallized bag



2 pav. Šiaudų šilumos laidumo koeficiento tyrimai laboratorinėmis sąlygomis, esant 10 °C vidutinei bandinio temperatūrai

Fig. 2. Measurement of thermal conductivity of straw in laboratory conditions at mean temperature of specimen of 10 °C



3 pav. Vakuuoti šiaudai metalizuotame maiše

Fig. 3. Evacuated straw in metallized bag

Vakuuotų bandinių šilumos laidumo koeficientas buvo nustatomas esant 0,1 kPa vakuomo dydžiui. Šilumos laidumo bandymams naudoti 500×500 mm ilgio ir pločio bandiniai. Bandinių storis sudarė nuo 120 mm iki 40 mm. Nustatyta, kad bandinių storis mažėjo kiekvieną kartą juos apspaudžiant ir didinant tankį kartotino šilumos laidumo matavimams.

Šilumos laidumo koeficiento matavimai atlikti naudojant šilumos laidumo matavimo prietaisą EP500 (Vokietija). Matavimo prietaiso ribos – nuo 0,5000 W/(mK) iki 0,0050 W/(mK), matavimų tikslumas – 0,0001 (W/mK). Matavimo prietaisas sujungtas su kompiuteriu. Visi matavimų parametrai – matavimų temperatūra, matavimų tikslumas, bandinių apspaudimas arba storis – valdomi kompiuteriu.

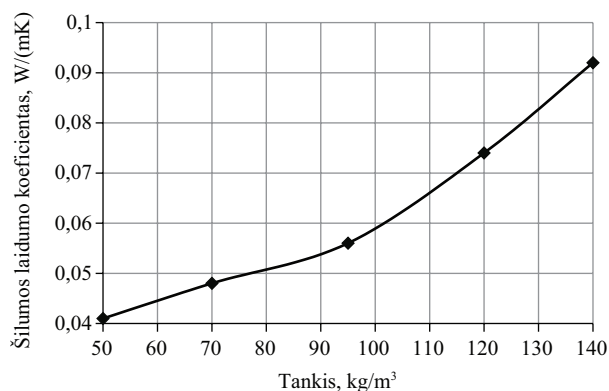
#### 4. Bandymų rezultatai

Išmatuoti orasausių šiaudų šilumos laidumo duomenys pateikti 4 pav.

Didėjant šiaudų tankiui nuo 50 kg/m<sup>3</sup> šilumos laidumo koeficientas gerokai didėja: šiaudų tankiui padidėjus du kartus, šilumos laidumo koeficientas padidėja 1,4–1,9 karto. Šilumos laidumo koeficientas labiau didėja, kai tankis yra nuo 100 kg/m<sup>3</sup> iki 140 kg/m<sup>3</sup>. Literatūros šaltiniuose nurodyta, kad pastatų atitvaroms gali būti naudojami šiaudai, kurių tankis – nuo 15 kg/m<sup>3</sup>, tačiau reikia atsižvelgti į jų suslūgimą eksploatuojant ir į ilgalaikį apkrovos, jei ji veikia atitvaroje, poveikį.

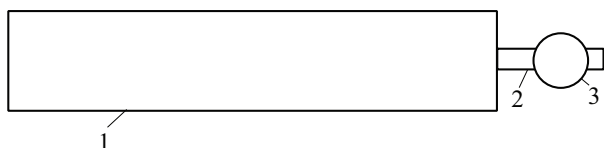
Tolesniems bandymams paruošti vakuuotų šiaudų bandiniai. Principinė bandinio schema pateikta 5 pav.

Vakuometru buvo reguliuojamas vakuomo dydis bandinyje. Bandiniui vakuuoti naudotos plėvelės duomenys pateikti 1 lentelėje.



4 pav. Šiaudų šilumos laidumo koeficiento priklausomybė nuo tankio

Fig. 4. The dependence of thermal conductivity on the density of straws



5 pav. Principinė vakuumuoto bandinio schema: 1 – šiaudai, įdėti į metalizuotą plėvelę; 2 – ventilis; 3 – vakuumetras

Fig. 5. Principled scheme of vacuum specimen: 1 – straw in metallized foil; 2 – valve; 3 – vacuumeter

1 lentelė. Barjerinės plėvelės sudėtis

Table 1. Composition of barrier coat

Sluoksnio numeris (nuo išorinės pusės)	Medžiaga (žymėjimas)	Storis, μm
1	Polietilenas (PE)	80
2	Polietileno tereftalatas (PET)	20
3	Aliuminio folija	10
4	Polietileno tereftalatas (PET)	20
		Bendras 130

Šilumos laidumo matavimo įrenginiu nustatytas vakuumuotų bandinių šilumos laidumo koeficientas esant 0,1 kPa vakuumo dydžiui. Bandymų rezultatai pateikti 2 lentelėje.

2 lentelė. Bandinių šilumos laidumo koeficientų, išmatuotų laboratorinėmis sąlygomis ir vakuumuotoje aplinkoje, palyginimas

Table 2. Comparison of thermal conductivity measured in laboratory conditions and in evacuated environment

Bandinio tankis, kg/m <sup>3</sup>	Šilumos laidumo koeficientas normaliomis laboratorinėmis sąlygomis, W/(mK)	Šilumos laidumo koeficientas po vakuumavimo, W/(mK)
95	0,0562	0,0071
120	0,0741	0,0087

Vakuumuotų šiaudų tankis buvo 95 kg/m<sup>3</sup> ir 120 kg/m<sup>3</sup>. 50–70 kg/m<sup>3</sup> tankio bandiniuose po vakuumavimo proceso vyko matmenų pokyčiai, todėl tolesniems bandymams tokie bandiniai nenaudoti. Pirmuoju atveju šilumos laidumo koeficientas po vakuumavimo sumažėjo 7,9 karto, o antruoju – 8,5 karto. Išreiškus šį dydį šilumine varža gaunama, kad termoizoliacinio sluoksnio, reikalingo dabartinių atitvarinių sienų izoliacijai, t. y. gauti šiluminę varžą  $R = 5,0 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ , storis iekia tik 3,55 cm. Taip pat toks termoizoliacinis sluoksnis apsaugotas nuo drėgmės ir dujų poveikio, užsidegimo. Mažėjant medžiagos šilumos laidumui vakuumuojant, gerėja ir medžiagos garso izoliacinės savybės (Caugberg, Tenpieric 2007).

## 5. Išvados

Mažiausias šilumos laidumas yra šiaudų, kurių tankis – 50–70 kg/m<sup>3</sup>. Esant tokiam tankiui, šilumos laidumo koeficientas kinta nuo 0,041 W/(mK) iki 0,048 W/(mK). Didėjant šiaudų tankiui nuo 50 kg/m<sup>3</sup> iki 140 kg/m<sup>3</sup>, jų šilumos laidumo koeficientas padidėja 2,2 karto.

Vakuumuojamų šiaudų šilumos laidumą galima sumažinti iki 8,5 karto. Tokį šilumos laidumo sumažėjimą lemia sumažėjęs šilumos perdavimas konvekcijos būdu, nes medžiagos viduje sumažėja oro molekulių kiekis.

Vakuumuotų termoizoliacinių medžiagų gamybai naudojamų šiaudų tankis turėtų būti 90–120 kg/m<sup>3</sup>. Tokio tankio konstrukcijoje nevyksta matmenų pokyčiai dėl didelio slėgių skirtumo. Kai šiaudų tankis didesnis nei 90–120 kg/m<sup>3</sup>, šilumos laidumo koeficientas gali padidėti dėl šilumos perdavimo laidumu per kietąjį medžiagos karkasą.

Termoizoliacinių medžiagų iš atsinaujinančiųjų išteklių tyrimus būtina tęsti, siekiant parinkti ar pagaminti patikimą ir mažai laidžią šilumai medžiagą, kurios gamybai reikia nedidelių energijos sąnaudų.

## Literatūra

Ahn, H. K.; Sauer, T. J.; Richard, T. L.; Glanville, T. D. 2009. Determination of thermal properties of composting bulking materials, *Bioresource Technology* 100: 3974–3981. doi:10.1016/j.biortech.2008.11.056

Andersen, B. M.; Munch-Andersen, J. 2001. *Halmballer og Muslinger som Isoleringsmaterialer*. Report 2001.

Arlauskienė, A.; Maikštėnienė, S.; Šlepetienė, A. 2009. Tarpinių pasėlių ir šiaudų įtaka vasarinių miežių mitybai azotu bei dirvožemio humuso sudėčiai [The effect of catch crops and straw on spring barley nitrogen nutrition and soil humus composition], *Žemdirbystė [Agriculture]* 96(2): 53–70.

Beck, A.; Heinemann, U.; Reidinger, M.; Fricke, J. 2004. Thermal transport in straw insulation, *Journal of Thermal Envelope and Building Science* 27(3): 227–234.

Caugberg, H.; Tenpieric, M. 2007. Sound reduction of vacuum insulation based sandwich panels, in *Proc. of the 8<sup>th</sup> International Vacuum Insulation Symposium, ZAE-Bayern/UniWue, Würzburg, September 18–19, 2007*, 1–8.

Commins, T. 1998. *R-value of straw bales lower than previously reported*. California Energy Commission.

Europos Parlamentas. Ekologiškesnio Europos Parlamento link [interaktyvus], [žiūrėta 2010 m. sausio 25 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.europarl.europa.eu>.

European Union. Energy Security & Transatlantic Cooperation [interaktyvus], [žiūrėta 2010 m. vasario 28 d.]. Prieiga per internetą: <www.eurunion.org>.

Fricke, J.; Schwab, H.; Heinemann, U. 2006. Vacuum insulation panels – exciting thermal properties and most challenging applications, *International Journal of Thermophysics* 27(4): 1123–1139. doi:10.1007/s10765-006-0106-6

- Gailius, A.; Vėjelis, S. 2009. *Termoizoliacinės medžiagos ir jų gaminiai* [Thermal insulating materials and their products]: vadovėlis. Vilnius: Technika. 247 p.
- Garas, G.; Allam, M.; El Dessuky, R. 2009. Straw bale construction as an economic environmental building alternative – A case study, *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences* 4(9): 54–59.
- Kazragis, A. 2005. Minimization of atmosphere pollution by utilizing cellulose waste, *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management* 13(2): 81–90.
- McCabe, J. 1993. *Thermal resistivity of straw bales for construction*: Diploma thesis. University of Arizona, Tucson, Arizona.
- Mickaitytė, A.; Zavadskas, E., K.; Kaklauskas, A.; Tupėnaitė, L. 2008. The concept model of sustainable buildings refurbishment, *International Journal of Strategic Property Management* 12: 53–68. doi:10.3846/1648-715X.2008.12.53-68
- STR 2.01.09:2005 *Pastatų energinis naudingumas. Energinio naudingumo sertifikavimas*. Vilnius, 2005.
- Šadauskienė, J.; Buska, A.; Burlingis, A.; Bliūdžius, R.; Gailius, A. 2009. The effect of vertical air gaps to thermal transmittance of horizontal thermal insulating layer, *Journal of Civil Engineering and Management* 15(3): 309–315. doi:10.3846/1392-3730.2009.15.309-315

## ANALYSIS OF THERMAL INSULATION FROM RENEWABLE RESOURCES

J. Vėjelienė, A. Gailius, S. Vėjelis

**Abstract.** One of the essential requirements for buildings is energy saving and heat retention. About 40% of the total energy consumed in the European Union is used for heating of buildings. Most of the energy consumed in buildings is used for heating during the cold period and cooling during the warm period. A significant part of energy can be saved due to suitable insulation of buildings. More efficient energy saving can be ensured by using heat-insulating materials produced from renewable resources. In Lithuania straw is often used for making thermal insulation obtained with a thermal conductivity of 0.040 W/(mK). Straw thermal conductivity under different conditions as well as possibilities to use it for producing heat-insulating materials are analysed in the work.

**Keywords:** vacuum insulation, thermal conductivity, renewable resources, straw, energy efficiency.

**Jolanta VĖJELIENĖ.** Ph.D. student at the Dept of Building Materials, Vilnius Gediminas Technical University (VGTU). Research interests: thermal insulation materials, vacuum insulation, renewable materials.

**Albinas GAILIUS.** Doctor, Professor at the Dept of Building Materials, Vilnius Gediminas Technical University (VGTU). Research interests: theoretical and experimental investigations of structure and properties of building materials, recycling and reuse of wastes in production of building materials in sustainable development context, durability, quality assurance and control of composite materials.

**Sigitas VĖJELIS.** Doctor, lecturer at the Dept of Building Materials, senior research worker at Research Institute of Thermal Insulation, Vilnius Gediminas Technical University (VGTU). Research interests: building materials, thermal insulation materials, their production, properties, application, evaluation of conformity, energy-efficiency of buildings.