ISSN: 2029-2341 / eISSN: 2029-2252

VILNIUS TECH
Vilnius Gediminas Technical University

SCIENCE – FUTURE of LITHUANIA

2026
Volume 18
Article ID: mla.2026.26861
Pages 1–5
https://doi.org/10.3846/mla.2026.26861

Civil engineering
Statybos inžinerija

BANGUOTŲ LAKŠTŲ GEOMETRINIŲ PARAMETRŲ ĮTAKA TERMOIZOLIACINIŲ MEDŽIAGŲ ŠILUMINĖMS SAVYBĖMS

Aliona DROZD, Sigitas VĖJELIS ✉

Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva

▪ gauta 2026 m. balandžio 29 d.
▪ priimta 2026 m. birželio 22 d.

Santrauka. Mažo tankio šilumos izoliacinės medžiagos eksploatacijos metu arba veikiamos nedidelių apkrovų pasižymi polinkiu suslūgti. Siekant padidinti jų atsparumą apkrovoms ir sumažinti deformacijas, įprastai didinamas medžiagos tankis, tačiau tai lemia didesnę konstrukcijos masę ir didesnes gamybos sąnaudas. Šiame tyrime, taikant skirtingus technologijos sprendimus, iš tekstilės pluoštų buvo suformuoti banguoti lakštai ir jų pagrindu pagamintos šilumos izoliacinės medžiagos. Nustatyta, kad banguota struktūra leidžia pagerinti mechanines bei defomacines savybes nedidinant nei tankio, nei šilumos laidumo. Iš banguotų lakštų pagamintų bandinių tankis kito nuo 76,8 iki 51,9 kg/m^3, o šilumos laidumas – nuo 0,0535 iki 0,0385 W/(m·K). Esminę įtaką šiems rodikliams turėjo bangos geometrija ir klijų sluoksnio savybės. Analogiškos sudėties, tačiau nesuklijuotų lakštų tankis buvo mažesnis (51,3–29,8 kg/m^3), o šilumos laidumas svyravo nuo 0,0530 iki 0,0371 W/(m·K).

Reikšminiai žodžiai: šilumos laidumas, medžiagos tankis, banguoti lakštai, atsparumas apkrovoms, šilumos izoliacinės medžiagos, stipruminiai rodikliai.

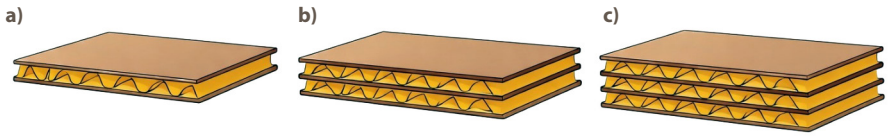
✉Autorius susirašinėti. El. paštas *sigitas.vejelis@vilniustech.lt*

1. Įvadas

Mažo tankio medžiagos paprastai pasižymi nedideliu mechaniniu stipriu. Taikant mechanikos inžinerijoje žinomus metodus, jų stiprumas gali būti padidintas naudojant bangavimą. Terminas „banguotas“ apibūdina lygiagrečių bangų ir įdubų sistemą, o bet kuri struktūra, kurios paviršius suformuotas lankstant, presuojant ar kitais būdais, laikoma banguota struktūra. Tokio tipo konstrukcijos plačiai taikomos statybos pramonėje: naudojami banguoti vamzdžiai, medienos pagrindo banguotos plokštės, metalinės sienų ir stogų dangos bei daugiasluoksnės plokštės. Labiausiai paplitęs panašios konstrukcijos pavyzdys yra gofruotas popierius (Buska et al., 2016; Anh & Pásztory, 2021).

Gofruotas popierius (žr. 1 paveikslą) yra plačiai naudojamas įvairiose srityse, įskaitant sodininkystę, transportą, logistiką ir sandėliavimą, nes efektyviai apsaugo gaminius nuo mechaninio poveikio. Jo struktūra sudaryta iš dviejų išorinių sluoksnių (dengiamųjų lakštų), tarp kurių suformuotas banguotas vidinis sluoksnis. Parinkus tinkamą sluoksnių geometriją, matmenis ir medžiagas, galima pasiekti reikiamą standumo ir stiprumo santykį išlaikant mažą konstrukcijos svorį. Esminį vaidmenį atlieka lengvas banguotas vidinis sluoksnis, kuris atskiria išorinius paviršius ir suteikia sistemai standumo (Asdrubali et al., 2015; Cekon et al., 2020).

Be gerų mechaninių savybių, gofruotas popierius pasižymi ir šilumos bei garso izoliacinėmis savybėmis. Tai ypač svarbu transportuojant temperatūrai jautrius produktus (Szewczyk & Bienkowska, 2020). Be to, tokios medžiagos gali būti naudojamos statyboje kaip durų, pertvarų ar baldų plokščių užpildas, taip pat kaip termoakustiniai elementai grindų ir sienų konstrukcijose ar klojinių formavimo



1 paveikslas. Gofruoto popieriaus pavyzdžiai: a) vieno sluoksnio; b) dviejų sluoksnių; c) trijų sluoksnių

© 2026 Straipsnio autoriai. Leidėjas Vilniaus Gedimino technikos universitetas

Šis straipsnis yra atvirosios prieigos straipsnis, turintis Kūrybinių bendrijų (Creative Commons) licenciją *(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)*, kuri leidžia neribotą straipsnio ar jo dalių panaudą su privaloma sąlyga nurodyti autorių ir pirminį šaltinį.

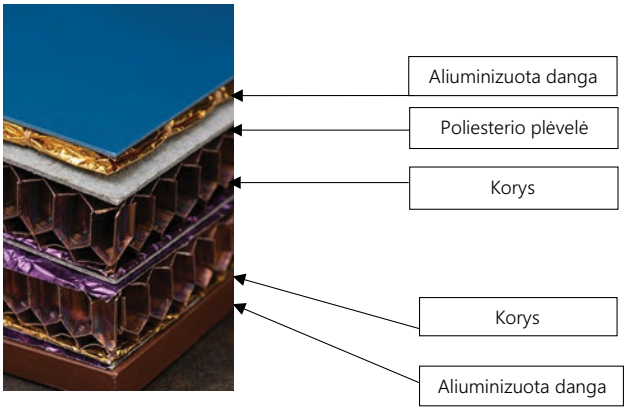
vamzdžiai betonavimui. Papildomi privalumai – mažas svoris, nedidelė kaina, paprastas montavimas ir demontavimas, pakankamas sandarumas, vibracijos slopinimas bei lengvas atliekų tvarkymas (Aliu et al., 2020).

Nepaisant šių savybių, gofruotas popierius nėra plačiai naudojamas kaip šilumos izoliacinė medžiaga dėl kelių trūkumų: mažo atsparumo drėgmei, ryškaus anizotropiškumo ir riboto storio. Drėgmės poveikiui jautrumą lemia naudojamos žaliavos – medienos plaušiena ir krakmolas. Anizotropiškumas atsiranda dėl gamybos technologijos, todėl mechaninės savybės skiriasi priklausomai nuo krypties. Be to, gamybos procesas riboja gaminio storį, nes bangavimas atliekamas naudojant dantytus volus, o sluoksniai iš karto suklijuojami, išlaikant formą. Paprastai sudaromi 2–9 sluoksniai, kurių vieno storis siekia 0,8–5 mm. Banguotų lakštų savybes apibūdina pagrindiniai geometriniai parametrai: storis, bangos aukštis, žingsnis ir vadinamasis lygios ir banguotos juostos ilgių santykis (angl. „take-up ratio“). Nustatyta, kad mechaninės savybės tiesiogiai priklauso nuo bangos profilio: didesnės bangos suteikia didesnį standumą, o mažesnės – geresnį lankstumą ir spausdinamumą.

Gofruotas popierius yra ryškiai ortotropinė medžiaga, nes jo savybės priklauso nuo pluoštų orientacijos sluoksniuose. Kita banguotų medžiagų grupė naudojama kosmoso technologijose – tai iš metalinių ar metalizuotų plėvelių gaminamos šilumos izoliacijos sistemos. Tokiose konstrukcijose sluoksniai dažnai išdėstomi kryžmiškai, taip užtikrinant vienodesnes stiprumo savybes abiem kryptimis. Sluoksniai gali būti sujungiami įvairiais būdais: suvirinant, lydant, siuvant ar kitais metodais. Naujausi tyrimai rodo, kad net ir plonų plėvelių šiluminė varža nėra nereikšminga, todėl būtina įvertinti tiek jų storį, tiek medžiagines savybes, įskaitant šilumos laidumą.

Banguotų medžiagų konstrukcijos, naudojamos kosminių aparatų šilumos izoliacijoje, pavyzdys parodytas 2 paveiksle. Tokiose konstrukcijose sluoksniuotos banguotos plokštės užtikrina tiek mechaninį stiprumą, tiek šiluminę apsaugą.

Ankstesni tyrimai rodo, kad banguotų medžiagų mechaninės savybės itin priklauso nuo geometrinių parametrų, tokių kaip bangos aukštis, žingsnis ir profilio forma (Mrówczynski et al., 2022; Miller & Clure, 1974).



2 paveikslas. Kosminių aparatų šilumos izoliacija

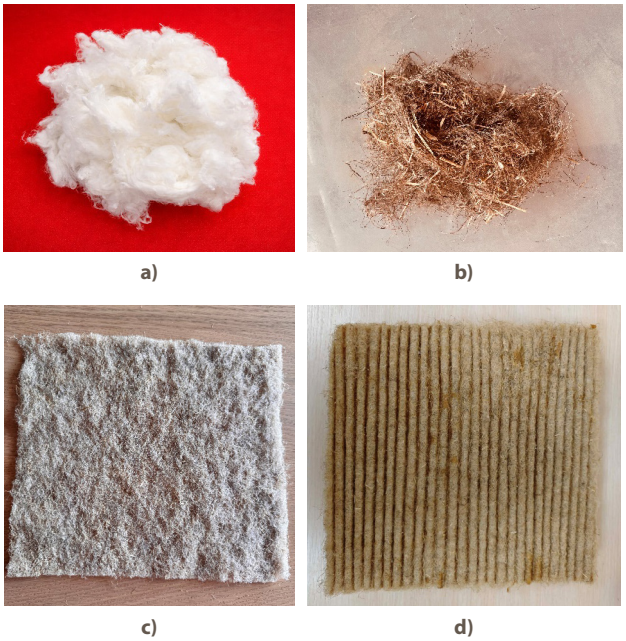
Nepaisant esamų tyrimų, banguotų izoliacinių medžiagų gamybai daugiausia buvo naudojamos ribotos žaliavų rūšys, o banguotos geometrinės struktūros įtaka šilumos laidumui išlieka nepakankamai ištirta. Todėl optimizuojant bangavimo parametrus ir gamybos procesus galima sukurti efektyvias, lengvo svorio izoliacines medžiagas, pasižyminčias pagerintomis šiluminėmis savybėmis (Birur et al., 2003; Consolo & Boetcheret al., 2023).

Apibendrinant literatūros analizę galima teigti, kad banguotų gaminių gamyboje naudojamas gana ribotas žaliavų spektras, o tyrimuose daugiausia dėmesio skiriama geometrinių parametrų įtakai mechaninėms savybėms, nepakankamai vertinant jų poveikį šilumos laidumui (Mrówczynski et al., 2022; Miller & Clure, 1974).

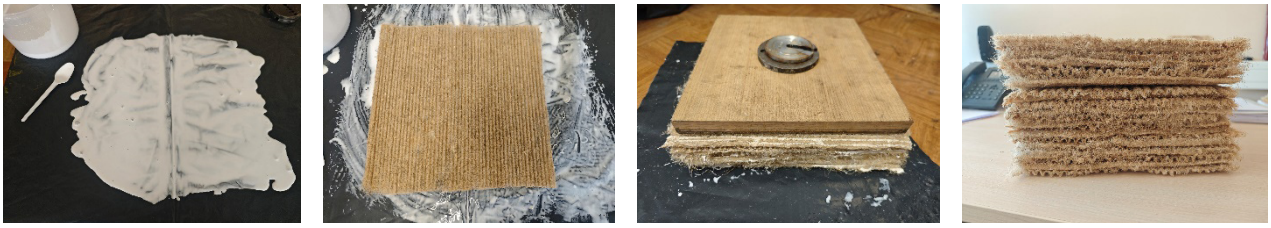
Šio tyrimo tikslas – sukurti iš atsinaujinančių žemės ūkio išteklių pagamintą šilumos izoliacinę medžiagą, pasižyminčią geromis šilumos išsaugojimo savybėmis ir atsparumu trumpalaikėms apkrovoms bei nusėdimui. Tikslui pasiekti buvo naudojamas kanapių pluošto ir polilaktido karšinys, iš kurio suformuoti banguoti elementai, vėliau suklijuoti į vientisą izoliacinę medžiagą. Siekiant įvertinti struktūros įtaką savybėms, buvo gaminami skirtingo bangos dydžio lakštai, o jų pagrindu suformuotų medžiagų šilumos laidumas, lenkimo stipris, gniuždymo stipris ir tankis buvo sistemingai tiriami (Cekon et al., 2020).

2. Medžiagos ir bandinių ruošimas

Banguoti lakštai buvo gaminami iš kanapių pluošto ir 20 % pluoštinio polilaktido karšinio, užtikrinant, kad medžiaga būtų pagaminta tik iš atsinaujinančių išteklių (žr. 3 paveikslą). Neaustinis karšinys (paviršiaus tankis 75 g/m^2, storis



3 paveikslas. Medžiagos gamyba: a) polilaktidas; b) kanapių pluoštas; c) karšinys; d) banguotas lakštas



a) b) c) d)

4 paveikslas. Banguotos termoizoliacinės medžiagos gamyba: a) PVA klijai; b) banguotas lakštas, suteptas klijais; c) klijais padengti ir suspausti lakštai; d) paruošta nauja termoizoliacinė medžiaga

10 mm) buvo pagamintas įmonėje „Neaustima“ (Lietuva), o kanapių pluoštas tiekiamas įmonės „Natūralus pluoštas“.

Banguoti lakštai iš karšinių buvo formuojami naudojant formas su skirtingo gylio ir žingsnio grioveliais. Buvo naudojami 3, 5 ir 7 mm gylio grioveliai bei 6, 10 ir 14 mm žingsniai, siekiant įvertinti bangos geometrijos įtaką šiluminėms ir mechaninėms savybėms. Formavimo metu karšiniai buvo suspaudžiami formoje ir kaitinami 200 °C temperatūroje 12 minučių, kad pradėtų lydytis polilaktido rišiklis, paskui aušinami 60 minučių, kad polilaktidas atvėstų ir sustandėtų, o lakštas išlaikytų banguotą struktūrą.

Paruošti lakštai buvo sudedami sluoksniais, kiekvieną antrą sluoksnį pasukant 90° kampu, kad bangos susikirstų statmenai (žr. 4 paveikslą). Sluoksniai buvo suklijuoti naudojant polivinilacetato (PVA) klijus. Priklausomai nuo bangos dydžio, buvo naudojami 8–18 sluoksnių, kad būtų pasiektas reikiamas storis. Suklijuoti lakštai buvo apspaudžiami 250 Pa apkrova, džiovinami natūraliai 72 valandas, kad įgautų pradinį stiprį, o vėliau džiovinami 70 °C temperatūroje iki pastovios masės.

3. Bandymų metodika

Termoizoliacinių medžiagų mėginių tankis buvo įvertintas pagal EN ISO 29470 (2020) standartą, naudojant šilumos laidumo bandymams jau paruoštus mėginius. Mėginio storis buvo matuojamas esant 250 Pa apkrovai.

Šilumos laidumo koeficientas buvo nustatytas remiantis EN 12667 standarto metodika. Kiekvieno banguoto lakšto storio tyrimams buvo paruošti po tris 300×300×50 mm dydžio mėginius. Prieš atliekant bandymus, mėginiai buvo kondicionuojami aplinkoje, kurioje santykinė drėgmė siekė 50±5 %, o temperatūra buvo 23±2 °C. Šilumos laidumo vertės buvo nustatytos vidutinėje 10 °C temperatūroje.

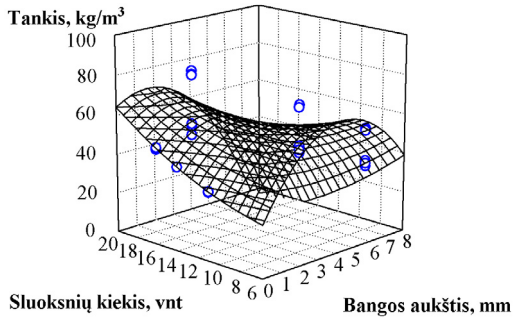
Gniuždomojo stiprio matavimai atlikti pagal EN ISO 29469 (2022) standarto reikalavimus. Tyrimams buvo paruošti penki 100×100×50 mm dydžio mėginiai. Rezultatu laikytas gniuždomasis įtempis, pasiektas esant 10 % deformacijai.

Lenkimo stipris buvo vertinamas pagal EN 12089 (2022) standarto reikalavimus, naudojant tris 300×100×50 mm dydžio mėginius.

Be to, buvo analizuojama pluoštų struktūra, kontaktinių zonų sandara bei makro- ir mikrostruktūra kontaktinėse lakštų vietose.

4. Rezultatai ir diskusijos

Gauti rezultatai parodė, kad tankis priklauso nuo sluoksnių kiekio ir bangos aukščio, tačiau šių veiksnių poveikis nėra nepriklausomas. Dviejų veiksnių dispersinė analizė atskleidė statistiškai reikšmingą sąveiką (F = 18,02, p < 0,001), rodančią, kad vieno veiksnio įtaka priklauso nuo kito. Didėjant sluoksnių skaičiui, tankis paprastai didėja, tačiau šis efektas skiriasi priklausomai nuo bangos aukščio. Mažėjant bangos aukščiui nuo 7 mm iki 3 mm tankis didėja, tačiau esant 0 mm jis sumažėja, tai rodo netiesinį ryšį. Tai leidžia teigti, kad egzistuoja optimalus bangos aukštis, užtikrinantis efektyviausią struktūrą. Tankio augimas stebimas esant mažam bangos aukščiui ir dideliam sluoksnių skaičiui. Apibendrinant galima teigti, kad tankio didėjimui svarbiausias yra šių parametrų tarpusavio derinimas, o ne atskiras jų optimizavimas. Santykinai „optimalus“ bangos aukštis tankiui didėti yra apie 3 mm, nes esant šiai reikšmei pasiekiamas didžiausias tankis ir geriausia sąveika su sluoksnių kiekiu. Toliau atlikta regresinė analizė, kuri parodė, kad tankio priklausomybė nuo bangos aukščio yra netiesinė, o neigiamas nario koeficientas patvirtina optimalaus bangos aukščio egzistavimą (5 paveikslas, 1 lygtis).



5 paveikslas. Termoizoliacinės medžiagos tankio sąryšis su sluoksnių kiekiu ir bangos aukščiu

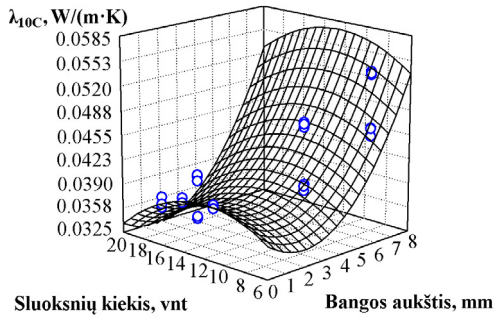
$$\text{Tankis} = 23{,}8022 - 0{,}28333 \cdot S.k + 22{,}63652 \cdot B.a + 0{,}11444^{S.k} - 2{,}03861^{B.a} - 0{,}7849709 \cdot S.k \cdot B.a, \quad (1)$$

$B.a$ – bangos aukštis, $S.k$ – sluoksnių kiekis, vnt.

$$S_r = 10{,}7\left(\frac{\text{kg}}{\text{m}_3}\right),\ R = 0{,}691,\ R^2 = 0{,}477.$$

Pateikti eksperimentiniai duomenys rodo, kad šilumos laidumo koeficientas priklauso nuo medžiagos sluoksnių

kiekio ir bangos aukščio (žr. 6 paveikslą). Matuojant šiuos parametrus pastebėta, kad didėjantis sluoksnių skaičius tiesiogiai lemia mažesnes šilumos laidumo vertes. Didžiausios šilumos laidumo reikšmės, siekiančios nuo 0,045 iki 0,053, užfiksuotos esant mažiausiam 8 sluoksnių ir 7 mm bangos aukščiui. Priešingai, esant 18 sluoksnių ir 3 mm bangos aukščiui, koeficientas nukrenta iki minimalių 0,031 iki 0,038 W/(m·K) reikšmių. Bangos aukštis taip pat turi reikšmingą įtaką, nes esant 0 mm aukščiui šilumos laidumo koeficientas išlieka santykinai stabilus (apie 0,037 iki 0,039 W/(m·K)) esant skirtingiems sluoksnių kiekiams. Regresinė analizė rodo (6 paveikslas, 2 lygtis), kad sluoksnių kiekio didinimas kartu su bangos aukščio mažėjimu yra pagrindinis veiksnys siekiant mažinti šilumos laidumo koeficientą. Efektyviausias kompozitas pasiekiamas naudojant 18 sluoksnių struktūrą esant minimaliam 3 mm bangos aukščiui.



6 paveikslas. Šilumos laidumo koeficiento priklausomybė nuo sluoksnių kiekio ir bangos aukščio

$$\left(\begin{array}{l}\lambda_{10\,^{\circ}C} = 2,777\cdot 10^{2} + 2.0167\cdot 10^{3}\cdot S.k - 2,194\cdot 10^{3}\cdot B.a - \\ 8,556\cdot 10^{5}\cdot S.k^{2} + 5,197\cdot 10^{4}\cdot B.a^{2} + 2,109\cdot 10^{5}\cdot S.k\end{array}\right), \quad (2)$$

B.a – bangos aukštis, *S.k* – sluoksnių kiekis, vnt.

$$S_r = 0,00344\left(\frac{\mathrm{w}}{\mathrm{m}\cdot\mathrm{K}}\right),\ R = 0,856,\ R^2 = 0,734.$$

5. Išvados

Šis tyrimas rodo, kad termoizoliacinės medžiagos gali būti efektyviai gaminamos iš banguotų tekstilės lakštų, gaunamų iš atsinaujinančių augalinės kilmės žaliavų. Eksploatacinės termoizoliacinių medžiagų savybės labai priklauso nuo plokščių bangos aukščio. Mėginiai su 3 mm aukščio bangomis turėjo mažiausią šilumos laidumą (0,0385 W/(m·K)) ir didžiausią gniuždymo stiprį (16 kPa), pasiekiant iki 22 kartų didesnį stiprumą nei nebanguoti lakštai, išlaikant šilumos laidumo charakteristikas, palyginamas su įprastinėmis izoliacinėmis medžiagomis.

Šis darbas žymi pirmą kartą sukurtą efektyvią termoizoliacinę medžiagą, naudojant banguotus augalinės kilmės tekstilės lakštus. Tolimesnis optimizavimas reikalingas našumui pagerinti, įskaitant tyrimus apie kilimėlio sudėtį, plokščių tankį ir storį, klijavimo metodus bei skirtingų bangų aukščių ir formų poveikį.

Autorių indėlis

Konceptualizacija – A. D. (Aliona Drozd); metodologija – S. V. (Sigitas Vėjelis) ir A. D.; validavimas – S. V. ir A. D.; formalioji analizė – S. V. ir A. D.; tyrimas – S. V. ir A. D.; ištekliai – S. V. ir A. D.; duomenų tvarkymas – S. V. ir A. D.; rašymas – S. V. ir A. D.; rašymas ir peržiūra bei redagavimas – S. V. ir A. D.; vizualizacija – A. D.; priežiūra – S. V. ir A. D. Visi autoriai perskaitė ir pritarė publikuotai rankraščio versijai.

Interesų ir finansavimo atskleidimas

Autoriai patvirtina, kad šioje studijoje nėra deklaruojamų finansinių ar asmeninių interesų, galinčių turėti įtakos tyrimo rezultatams.

Literatūra

Aliu, S., Amoo, O. M., Alao, F. I., & Ajadi, S. O. (2020). Mechanisms of heat transfer and boundary layers. In R. O. Fagbenle, O. M. Amoo, S. Aliu, & A. Falana, *Woodhead publishing series in energy*, *applications of heat, mass and fluid boundary layers* (pp. 23–53). Woodhead Publishing. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817949-9.00010-4

Anh, L. D. H., & Pásztory, Z. (2021). An overview of factors influencing thermal conductivity of building insulation materials. *Journal of Building Engineering*, *44*, Article 102604. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102604

Asdrubali, F., Pisello, A. L., Alessandro, F. D., Bianchi, F., Cornicchia, M., & Fabiani, C. (2015). Innovative cardboard based panels with recycled materials from the packaging industry: Thermal and acoustic performance analysis. *Energy Procedia*, *78*(78), 321–326. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.652

Birur, G. C., Siebes, G., Swanson, T. D., & Meyers, R. A. (2003). Spacecraft thermal control. In *Encyclopedia of physical science and technology* (3rd ed., pp. 485–505). Academic Press. https://doi.org/10.1533/9780857096081

Buska, A., Mačiulaitis, R., & Rudžionis, Ž. (2016). Mineral wool macrostructure parameter's relation with product's mechanical properties. *Materials Science – Medžiagotyra*, *22*(1), 113–117. https://doi.org/10.5755/j01.ms.22.1.9434

Cekon, M., Struhala, K., & Slávik, R. (2020). Cardboard-based packaging materials as renewable thermal insulation of buildings: Thermal and life-cycle performance. *Journal of Renewable Materials*, *5*(1), 84–93. https://doi.org/10.7569/JRM.2017.634135

Consolo, R. C., & Boetcher, S. K. S. (2023). Chapter one – Advances in spacecraft thermal control. In J. P. Abraham, J. M. Gorman, & W. J. Minkowycz (Eds.), *Advances in heat transfer* (Vol. 56, pp. 1–50). Elsevier. https://doi.org/10.1016/bs.aiht.2023.04.001

European Committee for Standardization. (2020). *Thermal insulating products for building applications – Determination of the apparent density* (EN ISO 29470:2020).

European Committee for Standardization. (2022). *Determination of compression behaviour* (ISO 29469:2022). European Committee for Standardization.

European Committee for Standardization. (2022). *Thermal insulating products for building applications* (EN12089:2013). European Committee for Standardization.

Mrówczynski, D., Knitter-Piatkowska, A., & Garbowski, T. (2022). Optimal design of double-walled corrugated board packaging. *Materials*, *15*(6), Article 2149. https://doi.org/10.3390/ma15062149

Miller, R. C., & Clure, J. L. (1974). *Metal-wool heat shields for space shuttle*; *prepared under Contract No. NAS1-12427* (document ID: 19740011469). NASA.

Szewczyk, W., & Bienkowska, M. (2020). Effect of corrugated board structure on mechanical properties. *Wood Research*, *65*(4), 653–662. https://doi.org/10.37763/wr.1336-4561/65.4.653662

THE INFLUENCE OF CORRUGATED SHEET PARAMETERS ON THE THERMAL PROPERTIES OF INSULATING MATERIALS

Abstract. Lightweight thermal insulation materials tend to undergo compression during service or under minor mechanical loads. To enhance mechanical performance and reduce deformation, material density is typically increased; however, this increases structural mass and production costs. In this study, the possibility of producing corrugated sheets from textile fabrics using various technological approaches and manufacturing thermal insulation materials from them was investigated.

It was found that a corrugated structure improves the material's mechanical and deformation properties without increasing either density or thermal conductivity. The density of specimens made from corrugated sheets ranged from 51.9 to 76.8 kg/m^3, while their thermal conductivity varied between 0.0385 and 0.0535 W/(m·K). The primary factors affecting these parameters were the wave geometry and the adhesive layer's properties. In contrast, sheets of the same composition but not bonded exhibited lower densities (29.8–51.3 kg/m^3) and thermal conductivity values ranging from 0.0371 to 0.0530 W/(m·K).

Keywords: thermal conductivity, material density, corrugated sheets, load-bearing capacity, thermal insulation materials, mechanical strength.