

Roman Kunič, Črtomir Tavzes, Andreja Kutnar • OGLJIČNI ODTIS TOPLOTNOIZOLACIJSKIH MATERIALOV V TOPLOTNEM OVOJU STAVB

OGLJIČNI ODTIS TOPLOTNOIZOLACIJSKIH MATERIALOV V TOPLOTNEM OVOJU STAVB

CARBON FOOTPRINT OF THERMAL INSULATION MATERIALS IN BUILDING ENVELOPES

dr. Roman Kunič, univ. dipl. inž. grad.^{a, b}**dr. Črtomir Tavzes, univ. dipl. biol.^c****doc. dr. Andreja Kutnar, univ. dipl. inž. les.^{c, d}**^a FRAGMAT TIM, d. d., Ob železnici 18, 1000 Ljubljana,
roman.kunic@fragmat.si^b Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo,
Katedra za stavbe in konstrukcijske elemente, Jamova 2,
1000 Ljubljana^c ILTRA, d. o. o., Celovška cesta 268, 1000 Ljubljana^d Univerza na Primorskem, Inštitut Andrej Marušič, Muzejski trg 2,
6000 Koper**Znanstveni članek**

UDK 504:699.82:699.86

Povzetek | Evropa je vodilna pri iskanju naprednih izolacijskih materialov in v razvoju inovativnih konstrukcijskih sklopov stavb, vključno z izkušnjami novih pristopov k energetski učinkovitosti, uporabi alternativnih virov energije in analizah v vseživljenjskem ciklu. Najpogosteje je prikazana razlika med posameznimi toplotnoizolacijskimi materiali v navajanju vpliva na okolje izključno po enoti mase samega proizvoda, redkeje po enoti mase na prostornino, pri tem pa je spregledano dejstvo, da so mase in vrednosti toplotne prevodnosti (λ) teh materialov izredno različne, kar močno vpliva na stopnjo potenciala globalnega segrevanja, ki ga povzročata izdelava in namestitvev posamezne toplotne izolacije v ovoj zgradbe v življenjski dobi. Za namene izoliranja zunanjšega ovoja stavb se uporabljajo različni toplotnoizolacijski materiali, ki se razlikujejo po kemijski sestavi (organski, anorganski), po izvoru (pridobljeni iz novih surovin, z delnim ali popolnim recikliranjem), po različni specifični teži, po različni toplotni prehodnosti (λ), po odpornosti proti fizikalnim kemijskim vplivom. Prav razlike med različnimi toplotnimi izolacijami, predvsem v lastnostih vpliva na okolje, specifični teži in toplotni prevodnosti (λ) so nas napeljale k izdelavi analitične študije, kjer smo neodvisno primerjali ogljični odtis posameznih izolacijskih materialov glede na dejanski učinek oziroma osnovni namen: učinkovito zaščito pred prehajanjem toplote. Ključne besede: trajnostna gradnja, ogljični odtis, potencial globalnega segrevanja, ekvivalent emisij CO₂, toplotne izolacije, toplotna izolacija ovoja stavb

Summary | Europe is leading in the search of advanced insulation materials and in the development of innovative structural solutions in buildings, including the experience in new approaches of energy efficiency, the utilisation of alternative energy sources, and life cycle analysis. Differences between thermal insulation materials in their impact on the environment are mostly presented per unit of weight of the material itself, rather than as weight per unit of volume. Such presentation circumvents the fact that the density and the thermal conductivity value are very different for these materials, the fact that greatly affects the rate of global warming potential caused by the installation of such thermal insulation in the building envelope. Materials used for insulating the building

envelope differ in their chemical composition (organic and inorganic), the origin (derived from new raw materials, through partial or complete recycling), densities and thermal insulation performances (thermal transmittance) and in the resistance to physical and chemical influences. Differences between various thermal insulations, especially in their properties of the environmental impact of densities and thermal conductivities (λ) were the impetus for making this analytical study, with the aim to independently compare different thermal insulating materials according to their environmental impact required for the basic purpose of thermal insulations: effective protection against heat transmittance.

Keywords: sustainable construction, carbon footprint, global warming potential, CO₂ equivalent of emissions, thermal insulations, thermal insulation of building envelope

1 • UVOD

Gradbeništvo je v praktično vseh državah v bruto nacionalnem dohodku udeleženo z vsaj desetimi odstotki, hkrati pa je poraba materialov, surovin in energije ter količina odpadkov v celotni življenjski dobi objektov celo 40 % vseh svetovnih količin (Kunič, 2007). Prav zato moramo večji poudarek posvečati varčevanju z neobnovljivimi viri energije, zmanjševanju porabe surovin in drugih virov, varovanju okolja, načrtovanju recikliranja ter skrbi za odpadke in njihovemu upravljanju, ki nastopajo kot rezultat zaključka življenjske dobe ali odstranitve objektov.

Vpliv družbe na okolje je vse intenzivnejši, kar vzbuja povečanje ozaveščenosti in nakazuje potrebo po varčevanju z energijo in varovanju okolja. Človek je s svojim delovanjem marsikje na planetu presegel absorpcijsko (oziroma akumulacijsko) zmogljivost okolja. Svetovno gospodarstvo je od začetka industrijske revolucije do zdaj slonelo na izkoriščanju relativno poceni energije, surovin in drugih virov. Zato postaja v tem stoletju pomanjkanje energije in posledično zviševanje cen energentov najbolj pereč problem človeštva. Večina razvitih svetovnih gospodarstev zato vse bolj razvija in udejanja koncepte varčevanja z energijo, okoljskega načrtovanja, popravil, recikliranja, ponovne uporabe in izdelave materialov ter končnih izdelkov. Slovenija uvaža kar 51 % (Statistični urad RS, podatki za leto 2009) vse potrebne energije, kar zaradi naraščajočih cen energentov na svetovnem trgu predstavlja še dodatno obremenitev za slovensko gospodarstvo, že tako še vedno precej bolj prizadeto zaradi finančne in gospodarske krize v zadnjih nekaj letih.

Poleg pomanjkanja poceni energije in drugih virov ter negotovosti dobave ključnih fosilnih energentov (nafta, zemeljski plin) se svet danes spopada tudi s problemom podnebnih

sprememb, ogromnimi količinami odpadkov in vse večjim onesnaženjem okolja. Trajnostni razvoj je nujna usmeritev z vidika vzdržnosti virov kot tudi z vidika ekonomske odgovornosti družbe. S trajnostnim razvojem želimo postopoma doseči, da cene produktov in storitev pokrivajo tudi stroške vplivov na okolje skozi celoten življenjski cikel.

Pomembnosti ohranjanja narave in zmanjševanja vplivov na okolje se zaveda tudi evropska politika. Evropska strategija o trajnostnem razvoju predvideva premagovanje trajnostnih izzivov za izboljševanje življenjskih razmer za sedanje in prihodnje generacije. Z učinkovitim upravljanjem in uporabo virov ter izkoriščanjem okoljskih in družbenih inovacijskih potencialov želi zagotoviti blaginjo, socialno kohezijo in varstvo okolja. Z okoljsko ozaveščenostjo želi doseči zmanjševanje onesnaževanja okolja ter spodbuditi razvoj trajnostnih vzorcev proizvodnje in porabe, s tem pa prekiniti povezavo med gospodarsko rastjo in degradacijo okolja (EPBD, 2010).

Za stavbe v svetu porabimo kar 24 % vseh zemeljskih virov (Bribian, 2011). V Evropi vsako leto povprečno na prebivalca porabimo za izgradnjo novih stavb 4,8 tone mineralnih virov (Wadel, 2009), kar je 64-krat več od povprečne teže človeka. V življenjskem ciklu stavb se največ energije porabi v času upravljanja, in sicer kar 90 % celotne energije, ki je povezana z življenjskim ciklom stavb ((Citherlet, 2007), (Newsham, 2009)). V Evropi predstavlja poraba energije za upravljanje stavb kar 42 % vse porabljene energije (Nelson, 2002). Posledično emisije ogljikovega dioksida, ki jih povzročijo stavbe, predstavljajo 35 do 40 % vseh povzročenih emisij. Evropske stavbe, namenjene bivanju in delu, so kljub vsemu med najbolj energetsko učinkovitimi na svetu. Žal ne moremo trditi,

da so stavbe v Sloveniji tako dobro toplotno izolirane kakor v razvitejšem in okoljsko bolj zavednem delu Evrope. Očitno pa je dejstvo, da imamo zaradi prizadevanj v zadnjih letih večji delež energetsko izredno učinkovitih stavb z letno potrošnjo energije za ogrevanje do 30 kWh/m² stanovanjske površine. Vseeno imamo v Sloveniji pretežni delež izredno potratnih stavb, ki porabijo v povprečju sedemkrat več energije za ogrevanje, kar znaša celo več kot 210 kWh/(m² a). Povprečna stanovanjska enota v Sloveniji potrebuje v skladu s statističnimi podatki (Statistični urad RS) približno trikrat več energije, kot je dovoljeno z novimi predpisi (PURES, 2010). Slab nivo kakovosti toplotnega ovoja stavbe je še toliko bolj skrb vzbujajoč, ker z obstoječo tehnologijo zmoremo že zdaj zgraditi energetsko učinkovite stavbe, ki bi porabile okrog petkrat manj energije od trenutnih povprečnih stanovanjskih enot v Sloveniji. Z izkoristkom toplotne energije odpadnega zraka, torej z rekuperacijskimi postopki v sistemih mehanskega prezračevanja, lahko dosežemo od osemkrat do dvanajstkrat manjšo trenutno potrošnjo energije za ogrevanje bivalnih in delovnih prostorov. Tako veliki kakovostni preskoki v zmanjševanju porabe energije za ogrevanje, ki jih merimo v mnogokratnikih in ne v odstotkih ali desetinah odstotkov, so v katerikoli tehnični stroki izredno redki, večinoma nedosegljivi.

Za različne toplotnoizolacijske materiale, ki jih uporabljamo v gradbeništvu, tako za široko uveljavljene kot tudi za nove, izredno učinkovite izolacijske materiale, smo opravili objektivno primerjalno analizo ogljičnega od-tisa v življenjskem ciklu in dobljene vrednosti primerjali z njihovim dejanskim učinkom toplotne izolacije. Objektivnost te primerjave smo dosegli tako, da smo poleg vrednosti potenciala globalnega segrevanja na težo materiala upoštevali tudi specifično težo posameznih materialov in razlike v njihovih toplotnih prevodnostih (λ).

2 • TEORETIČNE OSNOVE – OGLJIČNI ODTIS GRADBENIH MATERIALOV IN STAVB

Trajnostni razvoj ima pomembno vlogo tudi v evropski razvojni strategiji Evropa 2020, ki se med drugim osredinja na učinkovito rabo virov. Tudi z najnovejšimi evropskim strategijami, kot je Načrt za prehod na konkurenčno gospodarstvo z nizkimi emisijami ogljika do leta 2050 (t. i. Kažipot 2050), poskuša Evropa zmanjšati vplive na okolje, kar je tudi usmeritev Slovenije. V želji po dolgoročnem izboljšanju stanja okolja je vlada konec leta 2011 izdala Uredbo o zelenem javnem naročanju (UZJN, 2011), ki spodbuja preoblikovanje obstoječega načina gradnje stavb v »zeleno«, z javnim naročanjem okoljsko manj obremenjujočega blaga, storitev in gradenj. Z Deklaracijo o aktivni vlogi Slovenije pri oblikovanju nove svetovne politike do podnebnih sprememb (UL RS, št. 95/2009) je opredeljena vizija Slovenije kot nizkoogljicne družbe do leta 2050. V osnutku Zakona o podnebnih spremembah (september 2011) so podane usmeritve zmanjševanja emisij toplogrednih plinov na področju stavb, ki predvidevajo uvedbo energetskega knjigovodstva za vse javne stavbe, informiranje javnosti ter podpora razvoju in uveljavljanju nizkoogljicnih standardov.

Debelina toplotne izolacije v ovoju stavb se ne povečuje le zaradi okoljske ozaveščenosti, temveč tudi zaradi visoke odvisnosti od uvoženih virov energije. Investicijski stroški so ob izbiri debelejših slojev toplotne izolacije v primerjavi s tipično obstoječo gradnjo višji, vendar postanejo obratovalni stroški bistveno nižji, celo v tolikšni meri, da postane zelo izolirana stavba stroškovno učinkovitejša v ce-

lotnem življenjskem ciklu. Ker v večini primerov toplotnih izolacij ovoja stavb povečana toplotna zaščita pomeni le dodaten vložek v večjo debelino toplotne izolacije, so to zdaleč najpomembnejše in najučinkovitejše naložbe v varčevanje z energijo (Kunič, 2009).

Za namene izoliranja zunanega ovoja stavb uporabljamo različne toplotnoizolacijske materiale, ki se razlikujejo po kemijski sestavi (organski, anorganski), po izvoru (pridobljeni iz novih surovin, delno ali celotno reciklirani), po različni specifični teži (od najmanj 12 kg/m³ do preko 250 kg/m³), po različni toplotni prevodnosti (λ znaša od najmanj 3 mW/(m K) do preko 45 mW/(m K)) ter po odpornosti na fizikalne (vlaga, povišana toplota, prisotnost UV-žarkov, tlačno, strižno, razplastno in druge trdnosti) in kemijske vplive (prisotnost organskih topil, vlage, oksidacija, gorenje ...).

Za trajnostno gradnjo je pomembno, da zmanjšamo porabo materialov, saj ob porabi materiala zmanjšamo možnosti za njegovo nadaljnjo uporabo in posledično njegovo koristnost za prihodnje generacije (Roberts, 1994). Izkoriščanje obnovljivih naravnih virov bi moralo temeljiti na trajnostnem in sonaravnem gospodarjenju (na primer z gozdovi) in na trajnostnem izkoriščanju domačih virov. Upoštevati moramo zadovoljstvo končnih uporabnikov stavb, ki je povezano s stroški, udobjem in varnostjo (Pearce, 1995). Zato so trajnostna stavba in njeni konstrukcijski sklopi oblikovani tako, da:

- varčujejo z energijo in drugimi viri, omogočajo recikliranje materialov, znižujejo emisije

- toksičnih snovi skozi celotni življenjski cikel stavb, od proizvodnje do končne razgradnje,
- so v harmoniji ali sozvočju z lokalno klimo, tradicijo gradnje, kulturo in okolico,
- so sposobni trajno izboljševati kakovost bivanja in hkrati vzdrževati okoljsko bilanco na lokalni in globalni ravni.

Ker so stavbe, kot smo navedli v uvodu, ključni akter pri rabi zemeljskih virov, predvsem v času njihove uporabe, je za dosego ciljev, ki so opredeljeni v strategijah EU, nujno potrebno osredotočenje na izboljšanje energetske učinkovitosti stavb.

Za nepristransko vrednotenje vplivov gradbenih materialov in stavb na okolje je edino smiselno uporabiti čim bolj objektivna merila okoljskih obremenitev, kot je analiza življenjskega cikla (LCA) oziroma ogljični odtis (ang. Carbon Footprint), s katerim ovrednotimo emisije toplogrednih plinov, povezane z izdelkom po količinsko najbolj pomembnem toplogrednem plinu – CO₂, ki služi kot osnovna enota. Ogljikov dioksid predstavlja osnovni antropogeni toplogredni plin, ki ruši energetske uravnoveženost Zemlje, predvsem v pogledu radiacijskega ohlajevanja. Ogljični odtis je seštev ekvivalentov toplogrednih plinov, ki jih neposredno ali posredno povzročijo organizacija, izdelek, storitev ali druga aktivnost, ki povzroča ali prispeva k izpustom toplogrednih plinov v določenem časovnem obdobju. Opredeljen je v enoti ekvivalenta CO₂ (CO₂-e). V izračun ogljičnega odtisa so poleg CO₂ vključeni tudi drugi toplogredni plini – metan (CH₄), dušikov oksidi (N₂O) in klorofloroogljikovodiki (CFC). Ti so sicer veliko močnejši toplogredni plini kot CO₂, vendar se jih splošno proizvede količinsko veliko manj, zato so njihove emisije preračunane na ekvivalentno količino CO₂ (CO₂-e) (Le Treut, 2007).

3 • METODE IN ORODJA RAZISKAVE

Vzporedno z razvojem trajnostne gradnje moramo vrednotiti okoljsko prijaznost materialov, izdelkov in novih proizvodnih procesov v celotnem življenjskem ciklu stavb (z analizo LCA (Life Cycle Assessment) in LCCA (Life Cycle Cost Assessment)), uporabljati materiale, ki ne škodujejo zdravju ter jih je mogoče reciklirati in za vsak razviti izdelek določiti scenarij trajnostne rabe ob koncu njegovega prvega življenjskega cikla. S pravilno izbiro izolacijskega materiala lahko močno zmanjšamo vplive na okolje, ki jih povzročajo stavbe v času nji-

hovega upravljanja. V zadnjih nekaj desetletjih se opravljajo številčne razširjene raziskave z namenom zniževanja vplivov stavb na okolje, hkrati pa se uvajajo nove metode ocenjevanja trajnosti gradenj (Sinha, 2012).

Pri pregledu poročil v promocijskih dokumentih ponudnikov izolacijskih materialov smo ugotovili, da je najpogosteje prikazana razlika med posameznimi toplotnoizolacijskimi materiali ravno v navajanju vpliva na okolje, po enoti teže samega proizvoda, kar pomeni, da te primerjave ne upoštevajo razlik v specifičnih

težah kot tudi ne različnih vrednosti toplotne prevodnosti (λ). Raziskave torej ne upoštevajo okoljskega vpliva glede na osnovni namen materiala: ustvarjanje čim večjega upora proti prehodu toplote.

V raziskavi, predstavljeni v tem članku, smo se osredinili na vrednotenje okoljskih vplivov toplotne izolacije v zunanjem ovoju stavbe. Zaradi preglednosti in primerljivosti smo upoštevali izključno okoljski vpliv same toplotne izolacije in pri tem zanemarili vpliv na okolje vseh drugih elementov, kot so nosilna stena, zaščitna konstrukcija, pritrdila, lepila, zaključni sloji ali ometi. Kot potrditvev tej odločitvi velja omeniti, da imajo mnogi sistemi fasad, sten in streh zelo podobne načine pri-

trjevanja in sestave ne glede na vrsto toplotnoizolacijskega materiala. Zaradi odločitve, da vrednotimo okoljski vpliv izključno same toplotne izolacije, smo izsledke študije naredili bolj uporabne, saj rezultati veljajo za katerikoli konstrukcijski sklop v zunanem ovoju stavbe (za zunanjo steno, ravne ali poševne stene, tla na terenu ...).

Primerjave okoljskih vplivov različnih izolacijskih materialov smo opravili s programsko opremo Simapro (SimaPro Analyst Indefinite, Ecoinvent v2, Product Ecology Consultants, PEC, Nizozemska) ((SimaPro, 2009), (Ecoinvent, 2010)), ki omogoča poenostavljeno natančno sledenje vsem materialnim tokovom skozi življenjski cikel ter dosledno klasifikacijo in kategorizacijo podatkov. Ogljični odtis smo določili z metodo IPCC 2001 GWP 100a V1.02 (Climate Change, 2001). Metoda vključuje faktorje glede na časovni okvir 100 let. Faktorje karakterizira (z izjemo CH_4) glede na potencial globalnega segrevanja zaradi izpustov emisij v zrak, pri čemer ne upošteva posrednih vplivov emisij CO, tvorjenja didušikovih monoksidov iz dušikovih emisij, ne upošteva vplivov zaradi emisij NO_x , vode, sulfatov idr. v nižji stratosferi in zgornji troposferi. V izračunih smo se omejili na emisije, ki jih izolacijski materiali povzročijo do vgradnje, brez upoštevanja emisij, ki jih povzročijo upravljanje stavb. Upoštevali pa smo debelino toplotne izolacije, ki je potrebna za izpolnjevanje pogoja toplotne prehodnosti v skladu z veljavnim predpisom (PURES, 2010), in sicer $0,28 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ za zunanje stene. Za izračune ogljičnih odtisov izolacijskih materialov smo uporabili emisijske faktorje iz podatkovne baze Ecoinvent 2.0. V preglednici 1 je prikazan seznam podatkov, ki so bili uporabljeni pri računanju ogljičnega odtisa nasled-

Sklop	Podatek
Masna bilanca uporabljenih materialov	<ul style="list-style-type: none"> Masa končnega izdelka Masa posameznih materialov, uporabljenih v izdelku Vir posameznih materialov Masa odpadnega materiala
Energija	<ul style="list-style-type: none"> Poraba električne energije na izdelek Poraba goriv (dizel, kurilno olje, bencin, les itd.) na izdelek
Voda	<ul style="list-style-type: none"> Poraba vode na izdelek (pitne vode in tehnične vode) Količina odpadne vode na izdelek in ravnanje z njo Emisije polutantov v vodi (tip in količine) na izdelek
Drugi odpadki in emisije	<ul style="list-style-type: none"> Emisije polutantov v zraku (tip in količine polutantov) na izdelek Preostali odpadni material, povezan s proizvodnimi procesi, npr. filtri, pepel itd.
Transport	<ul style="list-style-type: none"> Tip transportnih vozil za dovoz materialov Razdalje Delež vozila, ki je neizkoriščen (prazen), in delež neizkoriščene povratne vožnje
Embalaza	<ul style="list-style-type: none"> Teža in tip materiala za zaščito in embalaza

Preglednica 1 • Seznam kvalitativnih podatkov za računanje ogljičnega odtisa

njih toplotnoizolacijskih materialov: EPS, EPS Neopor, XPS, PU – poliuretan, steklena volna manjše gostote, steklena volna večje gostote, kamena volna manjše gostote, kamena volna večje gostote, lesna volna, reciklirana celuloza, pluta, penjeno steklo, aerogel in VIP-panel. Ogljični odtis različnih toplotnoizolacijskih materialov smo izračunali z upoštevanjem debeline toplotne izolacije, ki je potrebna za izpolnjevanje pogoja toplotne prehodnosti v skladu z veljavnim predpisom (PURES, 2010), ki lahko znaša največ $0,28 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. Rezultate izračunov ogljičnih odtisov smo nato primerjali na enoto površine ovoja (m^2) individualne

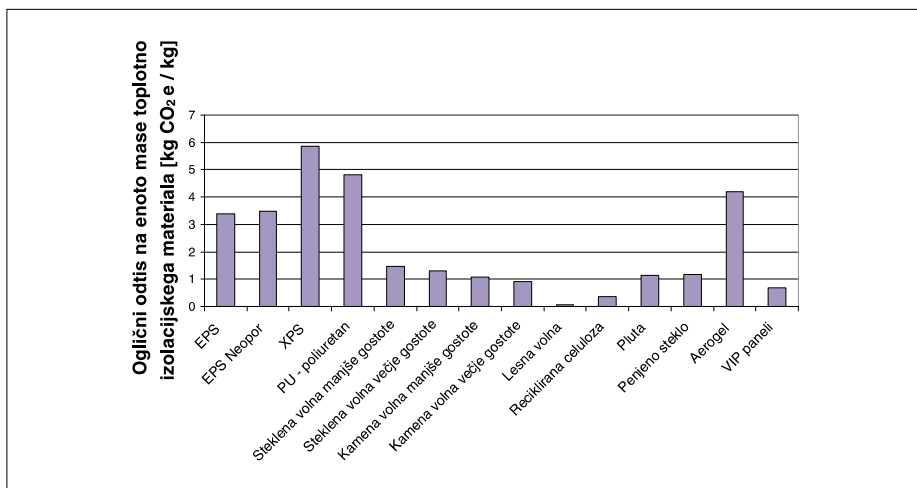
hiše in identičnim okoljskim vplivom, ki ga povzročimo s potovanjem z osebnim avtomobilom srednjega razreda. Ogljične odtise toplotnoizolacijskih materialov smo primerjali tudi z ogljičnimi odtisi drugih gradbenih materialov. Primerjavo smo opravili med vplivom na okolje, ki ga povzročimo z izolacijo celotnega zunanega ovoja individualne hiše (400 m^2), s toplotno prehodnostjo $U = 0,28 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$, z vplivom na okolje drugih gradbenih materialov, in sicer armiranim betonom, zidaki iz žgane gline, ravnim okenskim steklom, PVC-jem, elementom iz jekla in elementom iz aluminija (Zabalza, 2009).

4 • REZULTATI ANALIZE IN NJIHOVO VREDNOTENJE

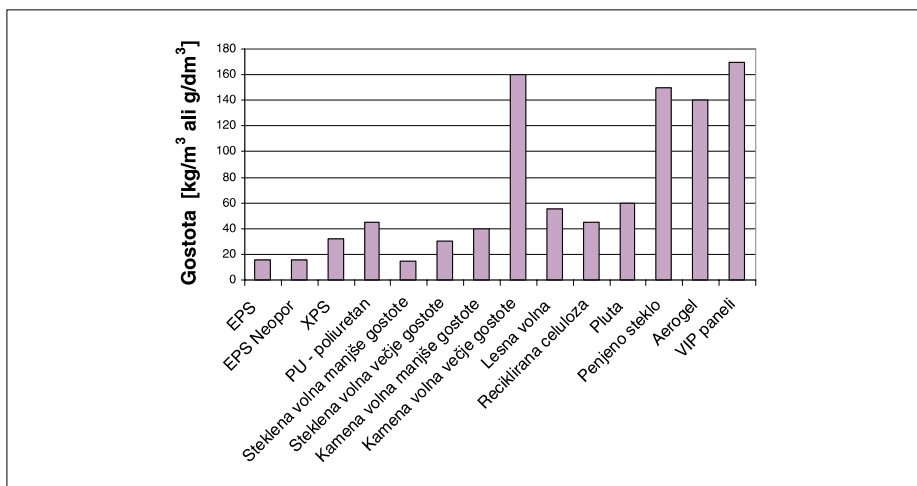
Vpliva na okolje nima samo potencial globalnega segrevanja določenega toplotnoizolacijskega materiala, izraženega v $\text{kg CO}_2\text{-e}$ na kilogram izolacijskega materiala ali njegova debelina, temveč je močno odvisen tudi od gostote različnih, v študiji upoštevanih izolacijskih materialov, ki variirajo od $15 \text{ kg}/\text{m}^3$ do $170 \text{ kg}/\text{m}^3$ in več (torej je razmerje večje kot 1 : 10), in od toplotne prehodnosti izolacijskega materiala (λ vrednost znaša od $6 \text{ mW}/(\text{m K})$ do $45 \text{ mW}/(\text{m K})$), kjer zaznavamo razmerje večje kot 1 : 7. V primerjavi z drugimi gradbenimi materiali in konstrukcij-

skimi sklopi imajo toplotnoizolacijski materiali najmanjši vpliv na okolje, ker v življenjskem ciklu s svojim relativno visokim toplotnim uporom preprečujejo izgube zaradi prehoda toplote (www.vattenfall.com). Na sliki 1 so prikazani ogljični odtisi različnih toplotnoizolacijskih materialov glede na maso, brez upoštevanja različnih gostot in razlik v toplotnih prevodnostih materialov (λ). Ker za določen učinek toplotne izolativnosti, torej za doseganje iste vrednosti toplotne prehodnosti (U), potrebujemo različno količino določenega materiala, primerjava na sliki 1 ne more služiti

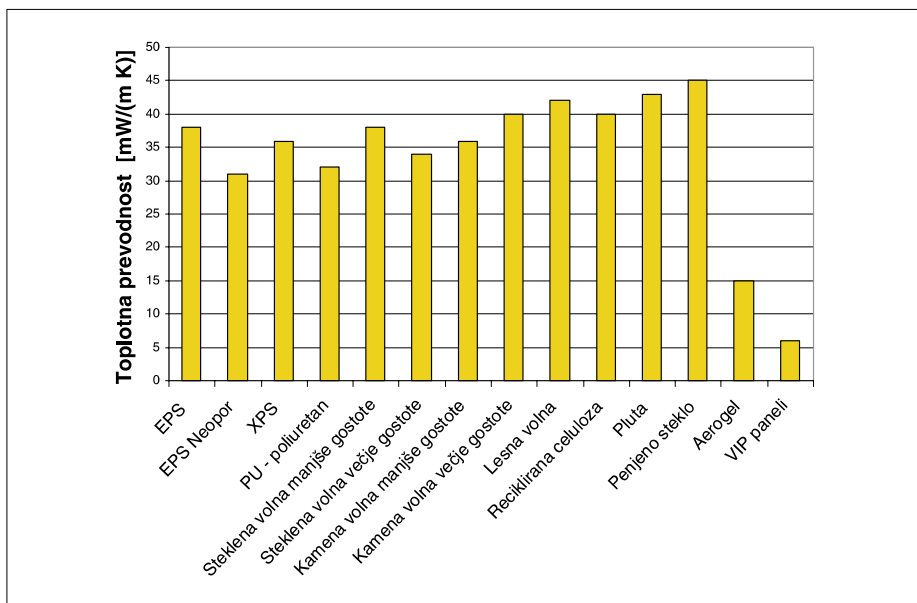
koč merilo pri odločanju za toplotnoizolacijski material z najnižjim vplivom na okolje. Gostote toplotnoizolacijskih materialov se gibljejo od $15 \text{ kg}/\text{m}^3$ do $170 \text{ kg}/\text{m}^3$ (slika 2). Tako kot gostote so tudi vrednosti toplotne prevodnosti (λ) izolacijskih materialov različne (slika 3). Razlike so sicer v večini manjše, vrednosti toplotne prevodnosti (λ) se gibljejo v razponu od $32 \text{ mW}/(\text{m K})$ do $45 \text{ mW}/(\text{m K})$, z izjemo visokoizolacijskih materialov – aerogel in vakuumskoizolacijski panel, ki imata bistveno nižje vrednosti toplotne prevodnosti (λ). Dejanski vpliv na potencial globalnega segrevanja, izražen v ekvivalentu emisij CO_2 za različne toplotnoizolacijske materiale, prikazuje slika 4. Na sliki je upoštevana debelina



Slika 1 • Ogljični odtis različnih toplotnoizolacijskih materialov, izražen na kilogram mase izbranega materiala



Slika 2 • Gostote različnih toplotnoizolacijskih materialov



Slika 3 • Vrednosti toplotne prevodnosti (λ) za različne toplotno izolacijske materiale, izražene v mW/(m K)

toplotne izolacije, ki je potrebna za izpolnjevanje pogoja toplotne prehodnosti v skladu z veljavnim predpisom (PURES, 2010), ki lahko znaša največ $0,28 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. Na sliki 4 je prikazan ogljični odtis na enoto površine ovoja (m^2), drugače kot na sliki 1, kjer je prikazan ogljični odtis v odnosu na enoto mase izolacijskega materiala. S primerjavo oziroma upoštevanjem debeline toplotne izolacije ugotovimo, da z izolacijami lesnega izvora, v danem primeru lesna volna, povzročamo najmanjši vpliv na okolje. Tudi reciklat celuloze, najpogosteje časopisni papir, ima nizek vpliv na okolje. Poleg tega les nastaja z biološkimi procesi, ki iz atmosfere vežejo CO_2 (fotosinteza). Dokler se ogljik (organska snov), vezan v organskih molekulah v izdelku, z izgorevanjem ali razkrojem ne pretvori nazaj v CO_2 in vodo, štejeemo, da je CO_2 skladiščen v izdelku. V analizi skladiščenja CO_2 v izolacijskih materialih na osnovi lesa nismo upoštevali. V primeru, da bi upoštevali oceno ekvivalenta CO_2 , skladiščenega v toplotnoizolacijskem materialu, bi bili ogljični odtisi materialov na osnovi lesnih vlaken še nižji.

Pri obeh izdelkih, lesni volni in časopisnem papirju, predstavljajo pretežni delež ogljičnega odtisa dodatki proti gnitju, trohnenju in gorenju. Mineralni volni, tako steklena kot tudi kamena, imata posebno v primerih nizkih gostot majhen vpliv na okolje. Podobno velja tudi za vakuumskoizolacijske panele, ki dosegajo dobre rezultate pri vrednotenju vplivov na okolje ravno zaradi svoje nizke toplotne prevodnosti (λ).

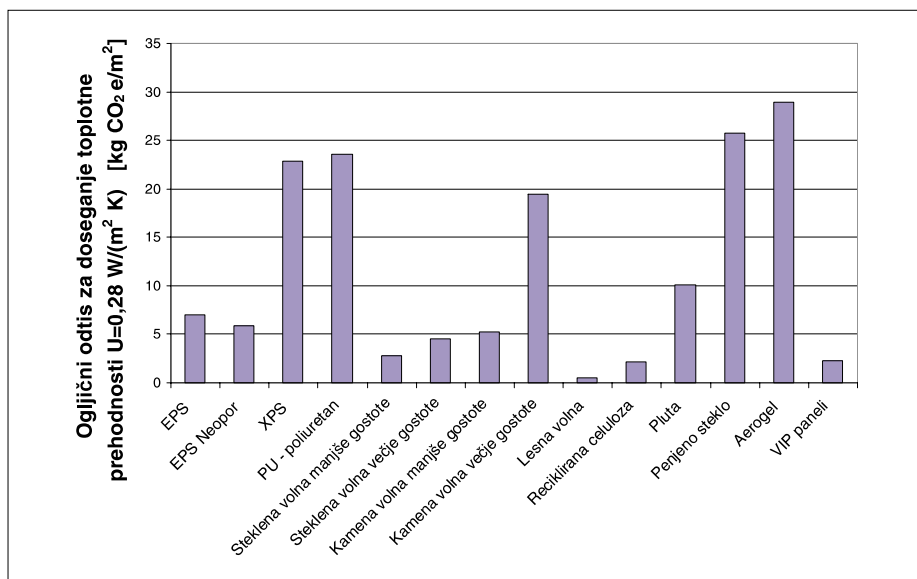
Preglednica 2 prikazuje povprečne gostote, povprečne vrednosti toplotnih prevodnosti (λ) za različne toplotnoizolacijske materiale, ki smo jih zajeli v analizi. Prikazani sta potrebna debelina posamezne vrste toplotne izolacije kot tudi potrebna masa letih na enoto površine, da bi dosegli toplotno prehodnost $0,28 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. Za osnovno nosilno konstrukcijo je upoštevan armiranobetonski zid debeline 15 cm, enostransko ometan s cementno-apnenim ometom debeline dveh centimetrov. Predzadnji stolpec preglednice 2 prikazuje ogljični odtis izbranih toplotnoizolacijskih materialov na enoto površine (tj. m^2) zaradi namestitve posamezne toplotne izolacije, da bi dosegli toplotno prehodnost $U = 0,28 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. V zadnjem stolpcu pa je izražen identičen ogljični odtis, ki ga povzročimo s prevoženjo razdaljo z avtomobilom srednjega razreda. Z relativno dobro toplotno prehodnostjo enega kvadratnega metra zunanega ovoja stavbe povzročimo enak vpliv, kot bi ga z avtomobilom, s katerim bi prevozili od 1,4 km

Toplotno izolacijski material	Povprečna gostota (ρ)	Toplotna prevodnost (λ)	Potrebna debelina toplotne izolacije za $U = 0,28 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$	Potrebna masa na enoto površine za $U = 0,28 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$	Ogljični odtis toplotne izolacije za $U = 0,28 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$	Ekvivalent razdalje prevoza z osebnim avtomobilom srednjega razreda
	kg/m^3	$\text{mW}/(\text{m K})$	cm	kg/m^2	$\text{kg CO}_2\text{-e}/\text{m}^2$	km
EPS	16	38	12,9	2,1	7,0	20,9
EPS Neopor	16	31	10,5	1,7	5,9	17,6
XPS	32	36	12,2	3,9	22,8	68,6
PU - poliuretan	45	32	10,8	4,9	23,5	70,7
Steklena volna manjše gostote	15	38	12,5	1,9	2,7	8,2
Steklena volna večje gostote	30	34	11,5	3,5	4,5	13,5
Kamena volna manjše gostote	40	36	12,2	4,9	5,3	15,8
Kamena volna večje gostote	160	40	13,5	21,7	19,5	58,5
Lesna volna	55	42	14,2	7,8	0,5	1,4
Reciklirana celuloza	45	40	13,1	5,9	2,2	6,5
Pluta	60	43	14,5	8,7	10,0	30,1
Penjeno steklo	150	45	14,8	22,2	25,7	77,2
Aerogel	140	15	4,9	6,9	29,0	87,0
VIP-paneli	170	6	2,0	3,3	2,3	6,8

Preglednica 2 • Primerjava med fizikalnimi lastnostmi toplotnoizolacijskih gradbenih materialov, ogljičnim odtisom različnih toplotnih izolacij za doseganje toplotne prehodnosti $U = 0,28 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ na enoto površine ovoja stavbe (m^2) in z okoljskimi vplivom, ki ga povzročimo s prevozom z osebnim avtomobilom srednjega razreda

do 87,0 km, odvisno od vrste toplotne izolacije in njenega okoljskega vpliva.

Umetni ali plastični materiali imajo v primerjavi z naravnimi materiali, kot je v našem primeru toplotna izolacija iz lesne volne, v pogledu splošne okoljske sprejemljivosti, uporabe virov in vpliva na okolje slabo oceno, kar z vrednostmi dokazuje tudi ogljični odtis. Ogljični odtis umetnih materialov znaša nad $3,38 \text{ kg CO}_2\text{-e}$ na kilogram mase materiala, kar je mnogo višje od ogljičnih odtisov naravnih toplotnoizolacijskih materialov, ki v povprečju znašajo od $0,061$ do $1,150 \text{ kg CO}_2\text{-e}$ na kilogram mase materiala (slika 1). So pa umetni ali plastični materiali izredno čvrsti, kompaktni, stabilni, se lažje vgradijo, imajo največkrat manjšo toplotno prevodnost (λ) kljub izredno nizki gostoti (v povprečju 12 do $35 \text{ kg}/\text{m}^3$) (slika 2). Navedene lastnosti jih postavljajo v prednost v primerjavi z drugimi, celo naravnimi izolacijskimi materiali, čeprav imajo ti bistveno manjši vpliv na okolje (slika 1) in



Slika 4 • Ogljični odtis toplotnoizolacijskih materialov debeline, ki je potrebna, da je dosežena toplotna prehodnost zunanjega ovoja $U = 0,28 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$, prikazan na enoto površine ovoja stavbe (m^2)

Toplotno-izolacijski material	Ogljični odtis toplotne izolacije za celotni ovoj stavbe, površine 400 m ² , U = 0,28 W/(m ² K)	Ekvivalent razdalje prevoza z osebnim avtomobilom srednjega razreda	Ekvivalent ogljičnega odtisa armiranega betona	Ekvivalent ogljičnega odtisa malte za omet	Ekvivalent ogljičnega odtisa zidaka iz žgane gline	Ekvivalent ogljičnega odtisa ravnega okenskega stekla	Ekvivalent ogljičnega odtisa PVC	Ekvivalent ogljičnega odtisa elementa iz jekla	Ekvivalent ogljičnega odtisa elementa iz aluminija
	kg CO ₂ -e	km	t	t	t	t	kg	kg	kg
EPS	2.781	8.351	15,5	11,5	10,3	4,0	652	1.822	324
EPS Neopor	2.349	7.054	13,1	9,7	8,7	3,4	551	1.539	274
XPS	9.135	27.432	51,0	37,9	33,7	13,1	2.141	5.986	1.066
PU - poliuretán	9.412	28.263	52,6	39,1	34,7	13,5	2.206	6.168	1.098
Steklena volna manjše gostote	1.093	3.282	6,1	4,5	4,0	1,6	256	716	128
Steklena volna večje gostote	1.794	5.388	10,0	7,4	6,6	2,6	421	1.176	209
Kamena volna manjše gostote	2.104	6.320	11,8	8,7	7,8	3,0	493	1.379	246
Kamena volna večje gostote	7.794	23.406	43,5	32,3	28,8	11,2	1.827	5.108	909
Lesna volna	191	573	1,1	0,8	0,7	0,3	45	125	22
Reciklirana celuloza	863	2.591	4,8	3,6	3,2	1,2	202	565	101
Pluta	4.015	12.057	22,4	16,7	14,8	5,8	941	2.631	468
Penjeno steklo	10.282	30.877	57,4	42,7	37,9	14,8	2.410	6.738	1.200
Aerogel	11.582	34.782	64,7	48,1	42,7	16,7	2.714	7.590	1.351
VIP-paneli	903	2.711	5,0	3,7	3,3	1,3	212	592	105

Preglednica 3 • Primerjava ogljičnega odtisa različnih toplotnoizolacijskih materialov toplotne prehodnosti $U = 0,28 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ v zunanjem ovoju stavbe površine 400 m^2 z ogljičnim odtisom drugih gradbenih materialov in transportom

hkrati v povprečju tudi za spoznanje večjo toplotno prevodnost (λ) (slika 3 in preglednica 2). Kot posledica vsega naštetega se, v nasprotju z uveljavljeno splošno oceno in slabim glasom nepoznavalcev in žal tudi številčnih strokovnjakov, izkaže, da imajo umetni materiali zaradi majhne gostote in izredno majhne toplotne prevodnosti (λ) lahko celo primerljiv ogljični odtis glede na isti učinek toplotne izolativnosti (enako vrednost toplotne prehodnosti U) z drugimi izolacijskimi materiali (slika 4 in preglednica 3).

Toplotnoizolacijski materiali, ki predstavljajo v primeru naših analiz največji vpliv na globalno ogrevanje, so predvsem ekstrudirani polistiren, poliuretanske pene, penjeno steklo

in kamena volna visoke gostote. Vzrok temu sta predvsem relativno visoka gostota omenjenih materialov in v mnogih primerih žal še vedno okoljsko pogojno sprejemljivi postopki proizvodnje.

Vpliv na okolje, ki ga povzročimo z namestitvijo toplotne izolacije v zunanji ovoj stavbe, da bi dosegli toplotno prehodnost v vrednosti $0,28 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$, kar za stene in tla predpisuje trenutno veljavni pravilnik (PURES, 2010), znaša največ $29,0 \text{ kg CO}_2\text{-e}$ (slika 4, preglednica 2) za vsak površinski meter (m^2) ovoja stavbe. Za primerjavo naj poudarimo, da podoben vpliv na okolje naredimo, če prepotujemo z osebnim avtomobilom srednjega razreda razdaljo 87 km . Nazorna je tudi primerjava

ogljčnega odtisa izolacije iz ekspandiranega polistirena za doseganje minimalnih zahtev za izolacijo individualne hiše z zunanjim ovojem 400 m^2 , ob upoštevanju toplotne prehodnosti $U = 0,28 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$, s čimer povzročimo skupni ogljični odtis v količini $2781 \text{ kg CO}_2\text{-e}$, kar je enako kakor potovanje v osebnem avtomobilu na razdalji 8351 km .

S primerjavo med vplivom na okolje, ki ga povzročimo z izolacijo celotnega zunanjega ovoja individualne hiše, ki ima v primeru naše analize in tudi sicer povprečno velikost okoli 400 m^2 , s toplotno prehodnostjo $U = 0,28 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$, z vplivom na okolje drugih gradbenih materialov (preglednica 3), vidimo, da za izdelavo toplotne izolacije za

celotni zunanji ovoj stavbe, tudi v primeru toplotne izolacije z visokim ogljičnim odtisom, kot je npr. poliuretanska pena, ki povzroči okoljski vpliv 9412 kg CO₂-e, naredimo enak vpliv na okolje kot z 52,6 tone armiranega betona (mimogrede, taista povprečna individualna hiša ima omenjenega materiala za približno 5-krat več), ali s 34,7 tone zidakov iz žgane gline (povprečna individualna

hiša ima približno 6-krat toliko opeke), ali z 2206 kg PVC-izdelkov, ali s 6168 kg jeklenih oziroma 1098 kg aluminijevih izdelkov. Enak vpliv naredimo tudi, če se z osebnim avtomobilom srednjega razreda prevozimo 28.263 km. Vrednosti ogljičnih odtisov drugih gradbenih materialov, ki so prikazani v preglednici 3, smo pridobili iz Zabalza in sod. (2009).

Poleg relativno nizkega ogljičnega odtisa toplotnoizolacijskih materialov, ti prispevajo k prihrankom energije stavb, zato jih uvrščamo v sam vrh najučinkovitejših ukrepov in naložb za varčevanje z energijo in posredno v zmanjševanje vplivov na okolje, kar smo dokazali z analizo (poudarek na preglednici 3) in kar potrjujejo tudi izsledki drugih analiz (npr. www.vattenfall.com).

5 • SKLEP

Gradbeništvo v vseh državah, kot tudi na globalnem svetovni ravni, predstavlja najmanj deset odstotkov v bruto nacionalnem dohodku. S še večjim deležem, približno štiridesetimi odstotki, so gradbena dejavnost, uporaba stavb, vzdrževanje in rušenje objektov zastopani pri porabi energije, porabi razpoložljivih surovin in pridelanih odpadkih (Kunič, 2007). Najbolj učinkovit ukrep zmanjševanja okoljskih vplivov stavb je pravilna izbira toplotnoizolacijskih materialov, ki omogoča varčevanje z energijo in drugimi naravnimi viri. Umetni ali plastični materiali imajo v primerjavi z naravnimi materiali, npr. toplotno izolacijo iz lesne volne, v pogledu splošne okoljske spre-

jemljivosti, uporabe virov in vpliva na okolje negativno oceno. Hkrati pa so ti materiali izredno čvrsti, kompaktni, stabilni, se lažje vgradijo, imajo največkrat manjšo toplotno prevodnost (λ) kljub izredno nizki gostoti. Zato se v nasprotju z uveljavljeno splošno oceno izkaže, da imajo umetni materiali zaradi majhne gostote in izredno majhne toplotne prevodnosti (λ) lahko primerljiv ogljični odtis z drugimi toplotnoizolacijskimi materiali glede na enak učinek toplotne izolativnosti (tj. ob isti vrednosti toplotne prehodnosti U).

S primerjanjem ogljičnega odtisa toplotnoizolacijskih materialov ob upoštevanju njihovega učinka z drugimi gradbenimi materiali

smo ugotovili, da toplotna izolacija z visokim ogljičnim odtisom (npr. poliuretanska pena) v zunanji ovoj stavbe s površino 400 m² in toplotno prehodnostjo $U = 0,28 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ povzroči enak okoljski vpliv kot približno petina v povprečno individualno stavbo vgrajenega armiranega betona.

Zaključimo lahko, da so okoljski vplivi toplotnoizolacijskih materialov v primerjavi z drugimi gradbenimi materiali, ki so vgrajeni v povprečne stavbe, majhni. Poleg tega je treba poudariti, da zaradi prihrankov energije (drastično zmanjšanje toplotnih izgub), ki jih omogočijo toplotnoizolacijski materiali, v vsakem letu po vgradnji ključno prispevajo k zmanjševanju vplivov stavb na okolje. Zato toplotne izolacije uvrščamo v sam vrh najučinkovitejših naložb za varčevanje z energijo in posredno v zmanjševanje vpliva na okolje.

6 • LITERATURA

- Bribian, I. Z.; Capilla, A. V., Uson, A. A., Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential, *Build Environ* 46, 1133–1140, 2011.
- Citherlet, S., Defaux, T., Energy and environmental comparison of three variants of a single family house during its whole life span, *Build, Environ*, 42, 591–598, 2007.
- Ecoinvent 2.0, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, Švica, 2010.
- EPBD, Energy Performance in Building Directive, Recas (2010/31/EC), 2010.
- Kunič, R., Načrtovanje vrednotenja vpliva pospešenega staranja bitumenskih trakov na konstrukcijske sklope, doktorska disertacija, Planning an assessment of the impact of accelerated ageing of bituminous sheets on constructional complexes, doctoral thesis. Ljubljana (COBISS.SI-ID 3774305), 2007.
- Kunič, R., Krainer, A., Ekonomična debelina slojev toplotnih izolacij v kontaktno-izolacijskih fasadah obodnih sten, *Gradbeni vestnik*, december 2009, let. 58, št. 12, str. 306–311, ilustr. (COBISS.SI-ID 4863329), 2009.
- Le Treut, H., Somerville, R., Cubasch, U., Ding, Y., Mauritzen, C., Mokssit, A., Peterson, T., Prather, M., Historical Overview of Climate Change. In: *Climate Change, The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M., Miller, H. L. (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.
- Nelson, W., Compressed Earth Blocks. In J. F. Kennedy, M. G. Smith & C. Wanek (Eds.), *The Art of Natural Building* (pp. 138–142), Gabriola Island BC, New Society Publishers, 2002.
- Newsham, G. R., Mancini, S., Birt, B. J., 2009, Do LEED-certified buildings save energy? Yes, but..., *Energy Build*, 41: 897–905, 2009.

- Pearce, A., Makarand, H., Vanegas, J., A decision support system for construction materials selection using sustainability as a criterion. V: Proceedings of the 28th Annual Conference, National Conference of States on Building Codes and Standards, Albuquerque, New Mexico, November 1–4, 1995.
- PURES, Pravilnik o učinkoviti rabi energije v stavbah, Ur. list RS, št. 52/2010, 30. 6. 2010, str. 7840, ISSN 1318-0576, leto XX, 2010.
- Roberts, D. V., Sustainable development – A challenge for the engineering profession. In Ellis, MD ed, The role of engineering in sustainable development, American Association of Engineering Societies, Washington DC: 44–61, 1994.
- Simapro, SimaPro Analyst Indefinite, Ecoinvent v2, Product Ecology Consultants, PEC, Nizozemska, www.pre.nl/default.htm, 2009.
- Sinha, A., Kutnar, A., Green building rating system – leadership in energy and environmental design (LEED), significance for wood industry, Sistem ocenjevanja zelenih stavb – leadership in energy and environmental design (LEED), pomen za lesno industrijo, Les (Ljubljana), 64(1/2), 1–5, 2012.
- UZJN, Uredba o zelenem javnem naročanju, Ur. list RS, št. 102/2011, 13. 12. 2011, str. 13611, ISSN 1318-0576, leto XXI, 2011.
- Wadel, G., Sustainability in industrialized architecture, Modular lightweight construction applied to housing (La sostenibilidad en la construcción industrializada. La construcción modular ligera aplicada a la vivienda), Doctoral Thesis. Polytechnic University of Catalonia-Department of Architectural Constructions, Available online at: <http://www.tdx.cat/TDX-0122110-180946>, 2009.
- Statistični urad Republike Slovenije, povzeto po: www.stat.si, 6. junij 2012.
- www.vattenfall.com, povzeto: 6. junij 2012.
- Zabalza, I., Aranda, A., Scarpellini, S., Diaz, S., Life Cycle Assessment in Building Sector, State of the art and Assessment of Environmental Impact for Building Materials, 1st International Exergy, Life Cycle Assessment and Sustainability Workshop & Symposium (ELCAS), Nisyros, Greece, 2009.