

POMEN VSEBOVANE ENERGIJE V IZBRANIH GRADBENIH PROIZVODIH ZA IZREDNO UČINKOVITE TOPLOTNE OVOJE STAVB

IMPORTANCE OF EMBODIED ENERGY IN SELECTED CONSTRUCTIONAL PRODUCTS FOR HIGHLY EFFICIENT THERMAL ENVELOPES

Martin Jenko, dipl. inž. grad.

Stiška vas 2, 4207 Cerklje na Gorenjskem

doc. dr. Mateja Dovjak, dipl. san. inž.

mateja.dovjak@fgg.uni-lj.si

doc. dr. Roman Kunič, univ. dipl. inž. grad.

roman.kunic@fgg.uni-lj.si

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo

Katedra za stavbe in konstrukcijske elemente, Jamova 2, Ljubljana

Znanstveni članek

UDK 621.186.4:699.8

Povzetek | Področje učinkovite rabe energije je že od prvih energetske krize izjemno aktualno, s tem pa posredno tudi sanacija energetske potratnih stavb v Sloveniji. Največ raziskav je bilo opravljenih na področju finančnih vložkov in prihrankov energije, potrebne za ogrevanje in hlajenje stavb, kot posledica izvedbe sanacijskih ukrepov v obnovo toplotnih ovojev. Pri tem pa vsebovana energija v primerjavi s porabljeno energijo v amortizacijski dobi toplotnega ovoja ostaja v večji meri slabo raziskana. Pri izvedbi sanacijskih ukrepov, ki so energetske učinkoviti in obenem prispevajo k varovanju okolja, je poznavanje vsebovane energije v gradbenih proizvodih izrednega pomena. Članek obravnava vsebovano energijo izbranih gradbenih proizvodov, toplotnoizolacijskih materialov. S ciljem varčevanja energije v stavbi z amortizacijsko dobo toplotnega ovoja tridesetih let je namen članka ugotoviti smiselnost vgradnje toplotnoizolacijskih gradbenih proizvodov, ki imajo različno veliko količino vsebovane energije. Predpostavili smo referenčni neizoliran objekt, izbrali in določili najpomembnejše konstrukcijske sklope za analizo in objekt locirali v tri različna karakteristična klimatska območja v Sloveniji z različno dobo trajanja ogrevalne sezone. Na podlagi zakonsko določene toplotne prehodnosti posameznega elementa stavbe smo najprej določili izgubo energije ogrevanja na kvadratni meter konstrukcijskega sklopa. S podatki vsebovane energije izbranih gradbenih proizvodov, pripadajočih gostoti in toplotnih karakteristik materiala smo izračunali količino vsebovane energije. V nadaljevanju smo mejne toplotne prehodnosti konstrukcijskih sklopov zaostriili do te mere, da je vsebovana energija v uporabljenih izolacijskih materialih predstavljala približno tretjino vse porabljene energije v amortizacijski dobi toplotnega ovoja. Rezultati analize so pokazali, da je večino organskih toplotnoizolacijskih materialov z izjemo plute in večino anorganskih toplotnoizolacijskih materialih z izjemo penjenega stekla energijsko smiselno vgrajevati v toplotni ovoj izbranega elementa stavbe. Pluta (2530 MJ/m^2) in penjeno steklo (1700 MJ/m^2) namreč močno presegata predpostavljeno razmerje energij v primerjavi s preostalimi proizvodi (od 170 MJ/m^2 do

1400 MJ/m²). Pluta kot izolacijski material s stališča razmerja energij ni primerna za izdelavo toplotnega ovoja, saj vsebovana energija v nobenem primeru ne doseže razmerja ena tretjina v primerjavi s porabljeno energijo v dobi trideset let. Penjeno steklo pa ima kopico drugih pozitivnih lastnosti (velika tlačna odpornost, izjemna odpornost proti vlagi in difuzijski pari), zato ga je smiselno uporabiti pod določenimi pogoji. Terasa kot konstrukcijski sklop ima zelo mile zakonsko predpisane mejne vrednosti toplotne prehodnosti, saj v amortizacijski dobi nastajajo prevelike toplotne izgube. Analiza vsebovane energije za sanacijo stavb ima velik pomen za celovito sanacijo stavbe. Omogoča nam lažji izbor proizvodov, ki krepijo energetska učinkovitost gradnje, s tem pa pripomoremo k nižjim emisijam CO₂ in tako tudi k zmanjšanim stroškom za obratovanje stavbe.

Ključne besede: vezana energija, vsebovana energija, toplotna izolacija, življenjski cikel, energetska bilanca, energetska sanacija

Summary | Since the first energy crisis, the field of energy efficiency, as well as rehabilitation of inefficient buildings in Slovenia, have been a current issue. Most research has been conducted in the field of financial inputs and energy savings, required for heating and cooling of buildings, as a result of the implementation of remedial actions in the reconstruction of thermal building envelopes. However, the scope of embodied energy compared to the energy consumed in the amortization period of the thermal envelope has not been researched thoroughly. The knowledge about embodied energy is extremely important when carrying out the remedial measures that are more energy efficient and at the same time contribute to the protection of the environment. This article deals with embodied energy of selected construction products, thermal insulation materials. With the aim of saving energy in the building process, the purpose of the article is to determine the differences in the use of building materials with high embodied energy with the intention to save the energy in the amortization period of the thermal envelope over thirty years. Our reference is a non-isolated object, where we selected and defined the most important construction products for analysis. We placed the object into three characteristically different climatic zones in Slovenia with different duration of the heating season. On the basis of the regulated U-value of each building element we calculated the loss of energy for heating per one square meter of the construction complex. Using the obtained data of embodied energy, densities and thermal characteristics of the material we calculated the amount of embodied energy. Later, we tightened the limit U-values to such an extent that the embodied energy represented about a third of all consumed energy in the amortization period of the thermal envelope. The results showed that the majority of organic thermal insulation materials, with the exception of cork, and most of the inorganic thermal insulation materials, with the exception of foam glass, are reasonable to use in the thermal envelope of the building. Cork (2530 MJ/m²) and foam glass (1700 MJ/m²) are above the assumed ratio of energies compared to other products (from 170 MJ/m² to 1400 MJ/m²). From the perspective of the ratio between energies, cork is not suitable material for the thermal envelope, because the embodied energy cannot reach one third of the energy consumed over the period of thirty years. Foam glass has plenty of other qualities (high pressure resistance, excellent resistance to moisture and vapor diffusion) and it is therefore reasonable to use it under certain conditions. The analysis has also shown that the terrace has not so strictly regulated limit of U-value, as it experiences excessive heat loss in the amortization period. Analysis of embodied energy for the rehabilitation of buildings is of great importance for the comprehensive rehabilitation of a building. It helps us select products that enhance the energy efficiency of a building and thereby contribute to lower CO₂ emissions and thus reduce the cost of operating the building.

Keywords: embodied energy, thermal insulation, life-cycle analysis, energy balance, energy rehabilitation

1 • UVOD

Gradbeništvo, industrija gradbenih proizvodov in ravnanje z gradbenimi odpadki predstavljajo velik delež gospodarske aktivnosti, ki s svojim delovanjem občutno vpliva na okolje in ga do določene mere degradira. V procesu načrtovanja stavbe moramo posvetiti veliko pozornosti varovanju okolja s poudarkom na varčevanju z neobnovljivimi viri energije, rabi obnovljivih virov energije, zmanjšanju porabe surovin in gospodarjenju z odpadki. Študije ((Crowther, 1999), (Crawford, 2003), (Pullen, 2006)) navajajo, da se največ primarne energije porabi v fazi pridobivanja surovin, izdelave posameznih proizvodov, kasnejšem vgrajevanju in transportu. Glavno vprašanje, na katero bo treba odgovoriti v prihodnosti, je, kako naj bo panoga trajnostno naravnana (količina vsebovane energije, možnost razgradnje in ponovne uporabe ...) in orientirana k posamezniku, k zdravemu bivalnemu in delovnemu okolju. Poleg različnih komponent, ki vplivajo na trajnostno gradnjo in povezovanje strok gradbeništva, arhitektov, urbanistov in drugih, je posebno pozornost treba nameniti tudi izbiri trajnostnih gradbenih proizvodov (Dovjak, 2013). Glavna problematika v Sloveniji se je začela z intenzivno gradnjo individualnih in večstanovanjskih objektov v obdobju od

začetka sedemdesetih do konca osemdesetih let (Marušič, 2014). Novi predpisi so v osemdesetih letih zahtevali dodaten sloj toplotne izolacije, vendar pa se je v praksi izkazalo, da so stanovanjske hiše večjih florisnih površin brez toplotne izolacije ali pa je ta neustrezna. V Sloveniji je zadnja leta mogoče opaziti trend povečanja investicij v obnovo starejših objektov, predvsem zaradi čezmerne rabe energije za ogrevanje v kurilni sezoni. Na trgu je dandanes veliko ponudnikov, ki ponujajo različne gradbene toplotnoizolacijske proizvode. Ti se med seboj razlikujejo tudi glede na izbiro gradnika izolacije, to pa kasneje privede do izbire optimalnega tehnološkega postopka izdelave izolacije. Marsikatera toplotna izolacija je z vidika porabe energije med samo proizvodnjo, vključno s pridobivanjem surovin, izjemno potratna. Vprašamo se, ali je z namenom varčevanja smiselno vgrajevati proizvode, ki že v osnovi vsebujejo veliko količino vsebovane energije (vgrajena, vsebovana, vezana ali vključena energija; ang. *embodied energy*).

Načrtovanje stavb v današnjem času še vedno poteka v smeri prizadavanja za ohranjanje energije na račun obratovalne energije. Pri tem je ključnega pomena ukrep na nivoju toplotne izolativnosti ovoja s povečanjem debeline to-

plotne izolacije. Ta ukrep predstavlja občutno večji delež k zmanjšanju rabe energije, kot pa je delež vsebovane energije stavbe oziroma njenih delov. Vendar pa raziskave dokazujejo ravno nasprotno. Raziskovalci ((Crowther, 1999), (Crawford, 2003), (Pullen, 2006)) ugotavljajo, da vsebovana energija predstavlja znaten delež celotne energije v življenjskem ciklu stavbe oziroma njenih delov. Vsebovana energija se namreč porabi enkrat v začetni fazi gradnje stavbe, medtem ko se operativni del energije zvišuje med efektivno življenjsko dobo zgradbe (Koskela, 1992). Ohranjanje oziroma zmanjševanje obratovalne energije lahko dosežemo z energetsko učinkovitimi napravami (ogrevanje, ohlajanje ...) in s sodobnimi toplotnoizolacijskimi materiali. Še več, Kumar Dixit s sodelavci (Kumar Dixit, 2010) navaja, da je vsebovano energijo mogoče zmanjšati z nizkoenergetsko intenzivnimi materiali, optimizacijo proizvodnega procesa in transportnih poti. Poznavanje vsebovane energije ima velik pomen pri celostni sanaciji stavbe, ki je energetsko varčna in obenem okolju prijazna.

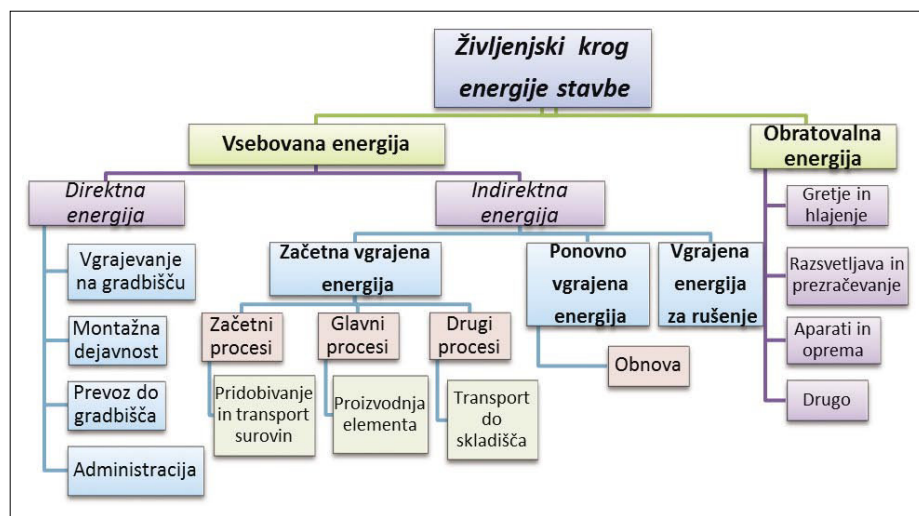
Namen članka je ugotoviti dejanski prihranek energije v določenem časovnem obdobju, ko v stavbi ovoj investiramo toplotno zaščito. Osredotočili smo se na porabo energije, ki je potrebna za izdelavo določenega gradbenega proizvoda (toplotnoizolacijskega materiala), od pridobivanja surovin, transporta do končne uporabe.

2 • VLOGA VSEBOVANE ENERGIJE PRI UČINKOVITI RABI ENERGIJE V STAVBAH

2.1. Vsebovana energija

Izbor materialov in tehnologij za gradnjo stavb mora biti usmerjen tako, da zadovolji potrebe posameznika kot tudi razvojne strategije družbe, hkrati pa mora imeti čim manjši škodljiv vpliv na okolje ((Rio Convention, 2002), (GC ZRMK, 2003)). V zadnjih letih se je zavedanje o okoljskih vidikih v sektorju gradbeništva povečalo. Proizvodni procesi gradbenih proizvodov izpuščajo v ozračje velike količine toplogrednih plinov, kot je denimo CO₂. Zato sta se pojavili velika skrb in pozornost za zmanjševanje emisij toplogrednih plinov v ozračje z namenom, da bi nadzirali škodljive vplive na okolje (Venkatarama Reddy, 2003).

Energijo v stavbi lahko razvrstimo v dve skupini, in sicer energijo za obratovanje oz. vzdrževanje njenega časa obratovanja in vse-



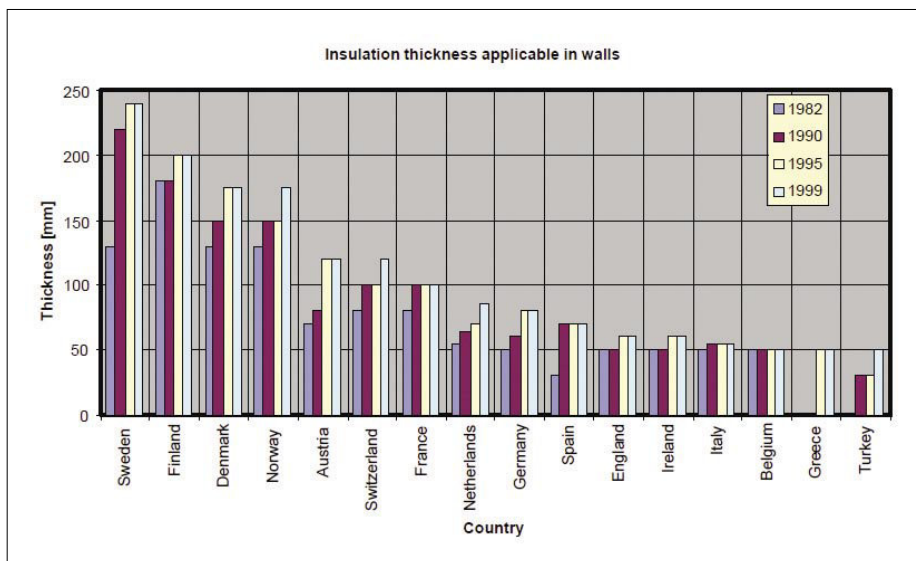
Slika 1 • Življenjski krog energije stavbe v povezavi s posameznimi gradbenimi proizvodi (Kumar Dixit, 2010)

bovano energijo oziroma vgrajeno energijo (ang. *embodied energy*) v gradbenih proizvodih, ki tvorijo stavbo kot celoto (slika 1). Izraz vsebovana energija se je uveljavil v začetku devetdesetih let, ko raziskovalec Tennenbaum definira metodo input-output oz. interpretira ekosistem energetskega toka (Tennenbaum, 1988). Predstavlja količino energije, ki je potrebna za proizvodnjo produkta, transporta do mesta vgradnje, same vgradnje in kasneje ustrezne odstranitve (Kumar Dixit, 2010). Kvantitativno jo izrazimo kot celotno vsoto posredne in neposredne potrebne energije za izdelavo proizvoda. V dobesednem pomenu je vsebovana energija računsko kvantitativna metoda, katere namen je določiti skupno porabo energije, od pridobivanja surovin, transporta, proizvodnje, predelave, obdelave, montaže in drugih stroškov, z namenom izdelave proizvoda ali storitev ter končno demontažo in skrb za odpadke (Kunič, 2008). Vsebovana energija v stavbah se lahko spreminja glede na izbiro gradbenih materialov in načina gradnje (Venkatarama Reddy, 2003). Venkatarama Reddy in Jagadish (Venkatarama Reddy, 2003) navajata, da vsebovano energijo tvorijo tri glavne komponente: a) poraba energije pri proizvodnem procesu izdelave oz. recikliranja gradbenih proizvodov; b) energija, potrebna za prevoz gradbenih proizvodov; c) energija, ki je potrebna za »spajanje različnih materialov, da se tvori stavba«, oziroma energija, ki je potrebna za demontažo gradbenih materialov. Če upoštevamo te tri glavne komponente vsebovane energije, lahko lažje izberemo proizvode, ki krepijo energetska učinkovitost gradnje, in s tem pripomoremo k nižjim emisijam CO₂ ter tako tudi zmanjšamo stroške gradnje stavb (Venkatarama Reddy, 2003).

2.2 Učinkovita raba energije

Ukrep na področju toplotne izolativnosti ovoj stavbe je bil v večini evropskih držav sprejet pred približno 40 leti. Velja za glavno orodje, ki se navezuje/odraža na učinkoviti rabi energije v stavbah. Raziskava (Papadopoulos, 2005) povzema zakonsko predpisane debeline toplotne izolacije v EU (slika 2). V večini evropskih držav zakonsko predpisana debelina iz leta v leto narašča. Situacija se od leta 1970 razlikuje glede na geografski položaj države v Evropi. V nekaterih državah so zahteve po debelini izolacije v istem obdobju skoraj podvojili, denimo v severni Evropi (Papadopoulos, 2005).

Prvi kakovostni predpisi, ki so se lotili problema toplotne izolacije stavb v Sloveniji, so

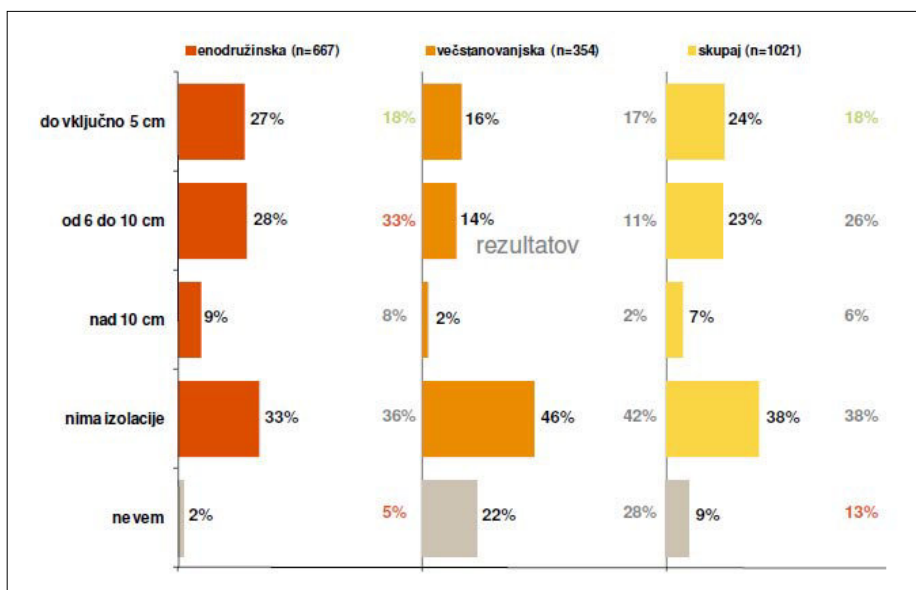


Slika 2 • Zakonski razvoj debeline izolacije po Evropi (Papadopoulos, 2005)

bili izdani leta 1970, in sicer v Pravilniku o tehničnih ukrepih in pogojih za toplotno zaščito stavb (SFRJ, 1970). Pravilnik je predpisoval največje dovoljene toplotne prehodnosti (W/m²K) elementov ovoja stavbe v odvisnosti od lokacije objekta oziroma klimatske cone. Služil je kot podlaga za izdelavo standarda JUS leta 1980 (GC ZRMK, 2002). Predpisane zahteve so nekoliko omilile porabo energije, saj je bil po tem pravilniku na primer za zunanjo steno v tretji klimatski coni največji dovoljeni koeficient 1,28 W/m²K. Šele leta 1980 se je na območju Slovenije zgodil večji preboj na področju zmanjševanja toplotnih izgub z uveljavitvijo obvezne uporabe standarda JUS

– Tehnični pogoj za projektiranje in graditev stavb (JUS, 1980). Za primer je bila v standardu definirana največja dovoljena toplotna prehodnost za zunanjo steno v tretji klimatski coni 0,83 W/m²K. Kljub drastični spremembi oziroma zaostrojitvi mejne vrednosti je bila toplotna zaščita stavb manj stroga v primerjavi s takratnimi trendi drugje po razviti Evropi. Če namreč preračunamo potrebno debelino dodatne izolacije, ta znaša približno 3 cm, pri čemer smo v takratnem obdobju primerljivi s Španijo (glej sliko 2 – rdeča črta).

V raziskavi REUS (raziskava energetske učinkovitosti Slovenije) iz leta 2012, opravila jo je agencija Informa Echo (REUS, 2013),

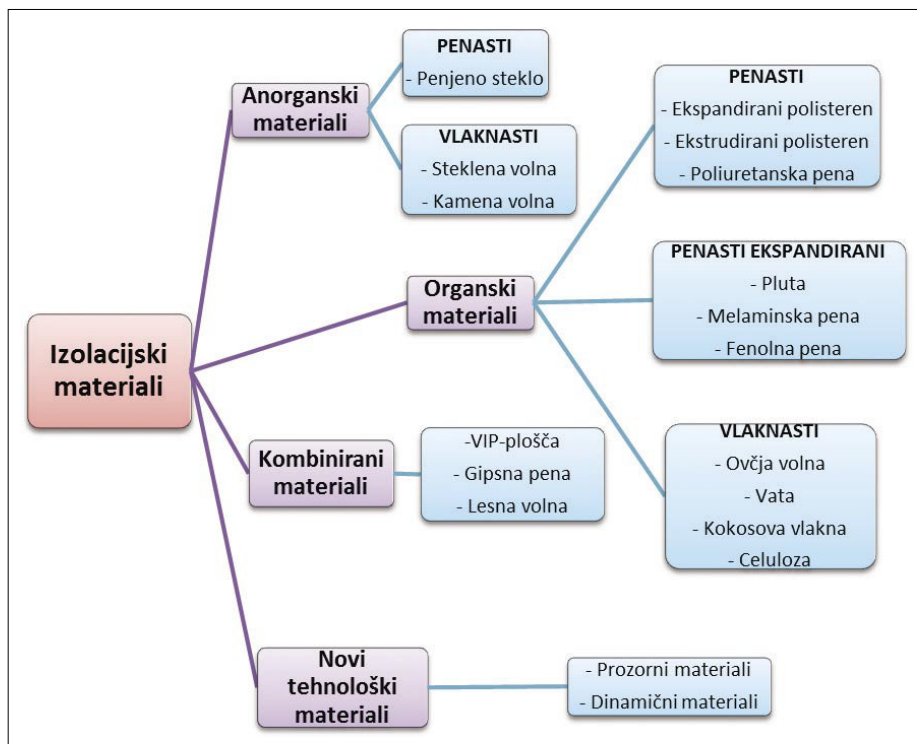


Slika 3 • Debelina toplotne izolacije stavb (REUS, 2013)

je bilo ugotovljeno, da ima okoli 27 % enodružinskih hiš debelino toplotne izolacije le pet centimetrov, 33 % individualnih stavb sploh nima toplotnega ovoja, delež neizoliranih večstanovanjskih stavb pa je 46 %, kar je razvidno tudi s slike 3. Torej 60 % enodružinskih in 75 % večstanovanjskih stavb po debelini izolacije spada med energetske neučinkovite. Le 9 % enodružinskih hiš bi lahko uvrstili v energetske učinkovite razred, saj imajo debelino izolacije nad 10 cm (REUS, 2013).

Slednje se odraža v veliki rabi energije za grejte in hlajenje stavb. Statistični urad Republike Slovenije (SURs, 2012) navaja, da gospodinjstva v Sloveniji porabijo več kot 20 % vse končne energije. Skupaj s pridelovalnimi dejavnostmi in gradbeništvom pa delež naraste čez polovico. Zmanjševanje rabe končne energije je pomembno z vidika zagotavljanja nemotene dobave energije in konkurenčnosti gospodarstva kakor tudi z vidika zmanjševanja vplivov na okolje (ARSO, 2014).

V Sloveniji analiza vsebovane energije v proces načrtovanja stavb še ni vključena. Omenjeno je nujno za sanacije oziroma novogradnje v prihodnosti. Pri analizi vsebovane energije ima velik pomen tudi vrsta gradbenega proizvoda. Najbolj razširjeni



Slika 4 • Shematična razdelitev toplotnoizolacijskih materialov (Papadopoulos, 2005)

gradbeni proizvodi za toplotno izolacijo so prikazani na sliki 4. Z namenom naše analize smo izbrali gradbene proizvode: ekspandirani polistiren, ekspandirani polistiren z dodanimi

aditivi (grafit), ekstrudirani polistiren, poliuretanska pena, steklena volna, kamena volna, celulozna vlakna, pluta, penjeno steklo, aerogel in vakuumskoizolacijski paneli.

3 • METODA

Za analizo vsebovane energije smo predpostavili neizolirano enodružinsko hišo. Objekt namišljeno umestimo v tri različne klimatske cone s čim bolj karakterističnim trajanjem kurilne sezone, in sicer v Ljubljano, Portorož in Rateče. Predvidena notranja temperatura v času ogrevalne sezone je 20 °C, kot predpisuje Pravilnik o učinkoviti rabi energije, PURES 2010 (RS, 2010).

V analizi smo primerjali več proizvodov za toplotni ovoj. Poglavitni podatek pri tem je računski debelina dodatne toplotne izolacije, saj je toplotna prehodnost U fiksna in neodvisna od položaja toplotnega ovoja. Najprej smo dimenzionirali potrebno izolacijo, da smo dosegli mejno vrednost, ki nam jo predpisuje pravilnik (MOP, 2010). Kasneje pa smo mejno toplotno prehodnost konstrukcijskega sklopa zaostriili in analizirali, pri kateri toplotni prehodnosti dobimo optimalno predpostavljeno razmerje energij (preglednica 1). Stremeli smo

k cilju, da mora vsebovana energija predstavljati približno tretjino vse porabljene energije v dobi tridesetih let. V teh tridesetih letih smo upoštevali le čas ogrevalnega obdobja. Pri izračunu prehoda energije smo se osredotočili na kvadratni meter posameznega dela konstrukcijskega sklopa. Obravnavali

smo štiri sklope, ki so z vidika porabe energije najbolj izpostavljeni:

- tla na terenu oziroma tla nad neogrevano kletjo,
- zunanja stena oziroma stena proti neogrevanim prostorom,
- strop proti neogrevanemu prostoru oziroma strop v sestavi ravnih streh ali poševnih streh,
- terase manjše velikosti, ki skupaj ne presegajo 5 % površine strehe.

Gradbeni elementi stavb, ki omejujejo ogrevane prostore	U - mejno (W/(m ² K))	U - zaostreno (W/(m ² K))
Zunanje stene in stene proti neogrevanim prostorom	0,28	0,15
Tla na terenu in tla nad neogrevano kletjo, neogrevanim prostorom ali garažo pri talnem ogrevanju	0,30	0,15
Strop proti neogrevanemu prostoru, stropi v sestavi ravnih ali poševnih streh	0,20	0,10
Terase manjše velikosti, ki skupaj ne presegajo 5 % površine strehe	0,60	0,20

Preglednica 1 • Tabela mejnih in zaostrenih toplotnih prehodnosti za posamezni konstrukcijski sklop

Pri analizi vsebovane energije smo upoštevali le energijske vrednosti za toplotne izolacije brez upoštevanja zaščitnih slojev, pritril in tehnologij vgrajevanja. Ti parametri so sicer nujni sestavni deli sistemov, vendar se sestava sistemov zelo razlikuje od vrste konstrukcijskega sklopa in izbire toplotne izolacije. Tako bi upoštevanje teh elementov oziroma parametrov zelo otežilo analizo in medsebojno primerjavo različnih proizvodov.

V analizi smo zajeli najpogosteje uporabljene toplotne izolacije na našem trgu. V preglednici 2 so prikazani z različnimi gostotami, ki se najpogosteje uporabljajo v gradbeništvu. Obe mineralni volni, kameno in stekleno, smo zaradi pogoste uporabe v različnih konstrukcijskih sklopih oz. z različnimi obremenitvami posledično analizirali z dvema različnima gostotama. V analize zajete toplotne izolacije se uporabljajo za toplotni stavbni ovoj ne glede na pozicijo (ravna ali poševna streha, stena, tla ...) ali konkretno rešitev (prezračevana, neprezračevana, z obremenitvijo ali brez nje ...). V preglednici 2 sta navedeni tudi vrednosti toplotnih prevodnosti (W/mK) in vsebovane energije (MJ/kg).

Vrednosti vsebovane energije smo privzeli iz podatkov, ki so trenutno na voljo v strokovni literaturi (študije, inštituti) in tehničnih dokumentacijah (okoljska proizvodna deklaracija, ang. Environmental Product Declaration, EPD) (preglednica 1). V članku je vsebovana energija smatrana kot skupek energij, ki so potrebne za izdelavo elementa brez upoštevanje energije za vgrajevanje, montažo, transporta, administracije ter energije potrebne za demontažo in ustrezno ravnanje z odpadki.

Gradbeni proizvodi in referenca izvora podatka	Gostota (kg/m ³)	Toplotna prevodnost (W/mK)	Vsebovana energija (MJ/kg)
EPS (Hammond, 2008)	25	0,037	100,2
	20	0,037	100,2
	16	0,037	100,2
EPS + aditivi ((IBO, 2000), (Sto, 2006))	12	0,032	100,2
	18	0,032	100,2
	16	0,032	100,2
XPS ((IBO, 2000), (Sto, 2006))	36	0,038	67,2
	45	0,038	67,2
	32	0,038	67,2
POLIURETAN (Hammond, 2008)	28	0,025	72,1
	100	0,025	72,1
STEKLENA VOLNA MIN GOSTOTA ((IBO, 2000), (Hammond, 2008))	45	0,025	72,1
	15	0,036	49,4
	40	0,036	49,4
STEKLENA VOLNA MAX GOSTOTA ((IBO, 2000), (Hammond, 2008))	22	0,036	49,4
	40	0,038	49,4
	150	0,038	49,4
KAMENA VOLNA MIN GOSTOTA ((IBO, 2000), (Hammond, 2008))	80	0,038	49,4
	20	0,040	26,4
	120	0,040	26,4
KAMENA VOLNA MAX GOSTOTA ((IBO, 2000), (Hammond, 2008))	70	0,040	26,4
	120	0,045	26,4
	200	0,045	26,4
CELULOZNA VLAKNA (IBO, 2000)	155	0,045	26,4
	30	0,044	10,5
	80	0,044	10,5
PLUTA ((Ecoinvent centre, 2006), (IBO, 2000), (KBOB, 2009))	60	0,044	10,5
	100	0,050	51,5
	220	0,050	51,5
PENJENO STEKLO ((IBO, 2000), (Pittsburgh, 2007))	160	0,050	51,5
	90	0,060	27,1
	200	0,060	27,1
AEROGEL (Aspen aerogels, 2014)	170	0,060	27,1
	60	0,017	53
	160	0,017	53
VIP PANELI (Schonhardt, 2003)	140	0,017	53
	170	0,006	249,7

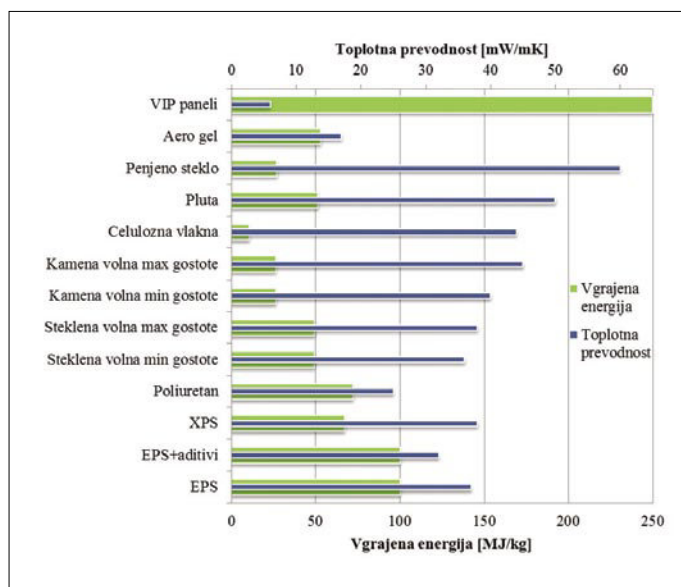
Preglednica 2 • Izbrani gradbeni proizvodi za izračun vsebovane energije s pripadajočimi koeficienti gostote in toplotne prevodnosti in referenco izvora podatka ((Jenko, 2014); (Hammond, 2008); (IBO, 2000); (Sto, 2006))

4 • REZULTATI

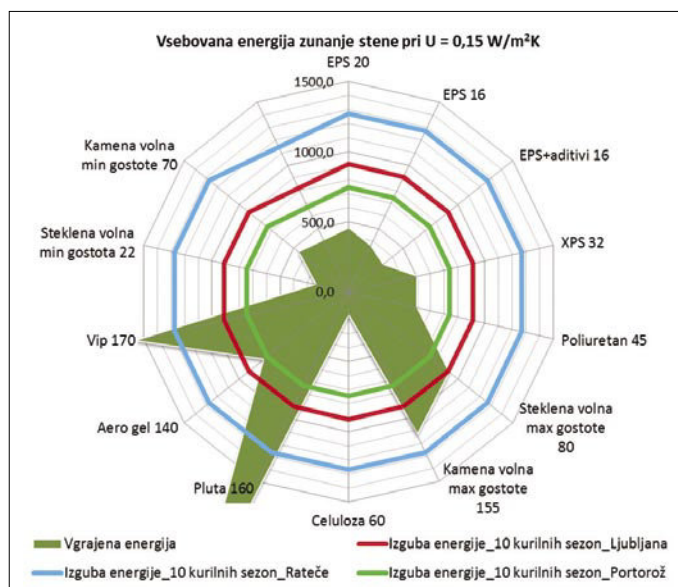
Slika 5 prikazuje razmerje med toplotno prevodnostjo izbranih gradbenih proizvodov in pripadajočo količino vsebovane energije.

Vakuumskoizolacijsko ploščo je kljub relativno visoki vsebnosti vsebovane energije smiselno uporabiti za toplotni ovoj pri ostrejšem pod-

nebju. Izkazalo se je tudi, da pluta kot izolacijski material s stališča razmerja energij ni primerna za izdelavo toplotnega ovoja, saj v nobenem primeru ne doseže razmerja iz osnovne predpostavke (da mora vsebovana energija predstavljati približno tretjino vse porabljene energije).



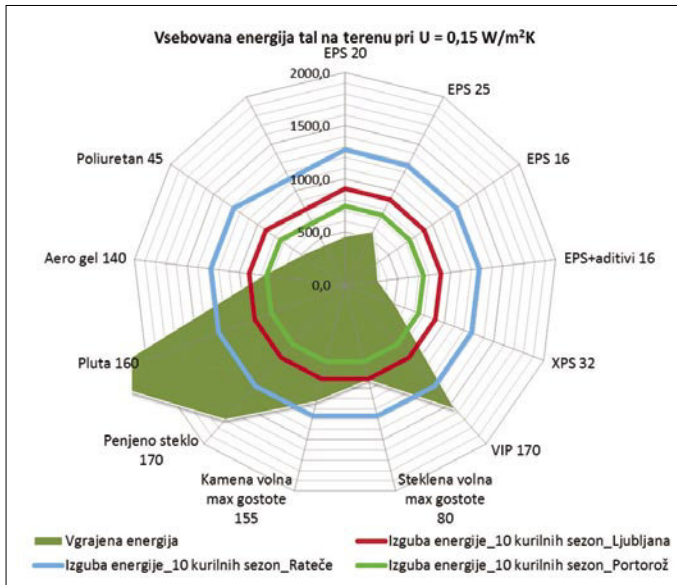
Slika 5 • Razmerje med toplotno prevodnostjo izbranih gradbenih proizvodov in pripadajočo količino vsebovane energije



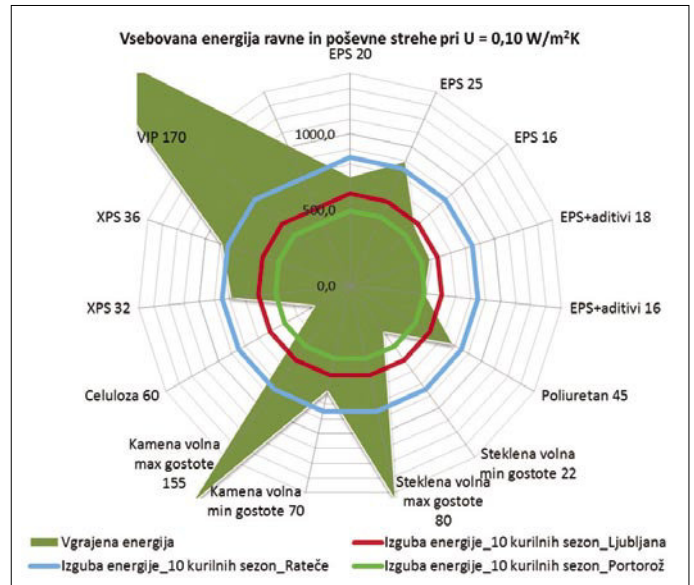
Slika 6 • Vsebovana energija (MJ) toplotnoizolacijskih materialov konstrukcijskega sklopa zunanje stene pri $U = 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ v primerjavi z izgubljeno energijo (MJ)

Material in pripadajoča gostota (kg/m ³)	Zunanja stena		Tla na terenu		Ravna in poševna streha		Terasa manjše velikosti	
	Δd (cm) pri $U = 0,28 \text{ W/m}^2\text{K}$	Δd (cm) pri $U = 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$	Δd (cm) pri $U = 0,30 \text{ W/m}^2\text{K}$	Δd (cm) pri $U = 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$	Δd (cm) pri $U = 0,20 \text{ W/m}^2\text{K}$	Δd (cm) pri $U = 0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$	Δd (cm) pri $U = 0,60 \text{ W/m}^2\text{K}$	Δd (cm) pri $U = 0,20 \text{ W/m}^2\text{K}$
EPS 25	/	/	10	23	17	36	5	17
EPS 20	11	23	10	23	17	36	5	17
EPS 16	11	23	10	23	17	36	5	17
EPS+aditivni 18	/	/	/	/	15	31	/	/
EPS+aditivni 16	10	20	9	20	15	31	4	15
XPS 36	/	/	/	/	18	37	/	/
XPS 32	12	23	11	23	18	37	5	18
Poliuretan 45	8	15	7	15	12	24	/	/
Steklena volna 80	12	23	11	23	18	37	5	18
Steklena volna 22	11	22	/	/	17	35	5	17
Kamena volna 155	14	28	13	28	21	43	6	21
Kamena volna 70	12	25	/	/	19	39	5	19
Celulozna vlakna 60	13	27	/	/	21	43	/	/
Pluta 160	15	31	14	31	/	/	7	23
Aero gel 140	5	10	4	10	/	/	2	8
VIP 170	2	4	2	4	3	6	1	3
Penjeno steklo 170	/	/	17	37	/	/	8	28

Preglednica 3 • Vrednosti dodatne debeline izolacije za posamezni konstrukcijski sklop pri različni toplotni prehodnosti



Slika 7 • Vsebovana energija (MJ) toplotnoizolacijskih materialov konstrukcijskega sklopa tal na terenu pri $U = 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ v primerjavi z izgubljeno energijo (MJ)

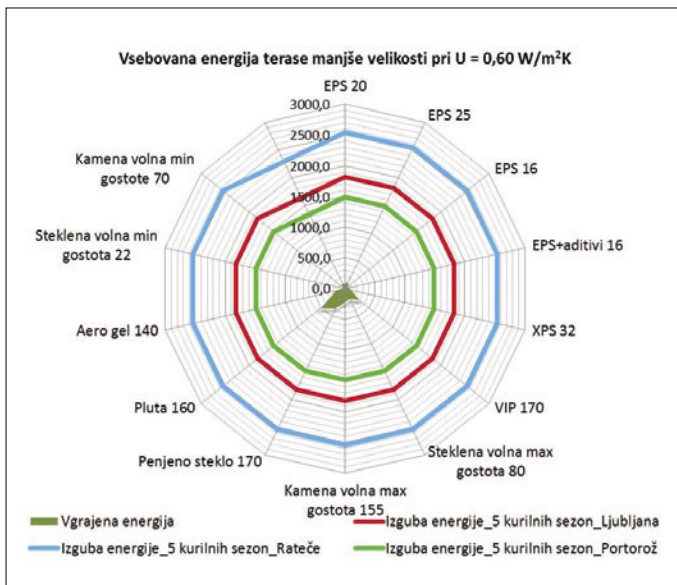


Slika 8 • Vsebovana energija (MJ) toplotnoizolacijskih materialov konstrukcijskega sklopa ravne in poševne strehe pri $U = 0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$ v primerjavi z izgubljeno energijo (MJ)

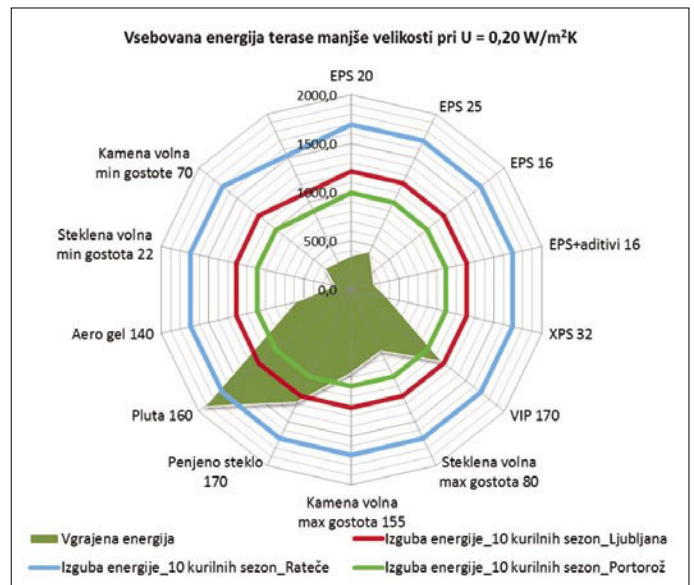
V preglednici 3 so predstavljene vse absolutne vrednosti dodatne debeline izolacije za posamezni konstrukcijski sklop pri različni toplotni prehodnosti. Najprej smo izračunali potrebno debelino izolacije, da smo zadoštili mejnim vrednostim (preglednica 1), nato smo toplotno prehodnost zaostriili in na podlagi dodatne izolacije (Δd) izračunali vsebovano energijo. Med organskimi materiali so se najbolj izkazali ekspanzirani polistiren (EPS) ($0,037 \text{ W/mK}$; $20, 25, 16 \text{ kg/m}^3$), ekspanzirani polistiren z

odanimi aditivi ($0,032 \text{ W/mK}$; $16, 18 \text{ kg/m}^3$), ekstrudirani polistiren (XPS) ($0,038 \text{ W/mK}$; $32, 36 \text{ kg/m}^3$), poliuretanska pena ($0,025 \text{ W/mK}$; 45 kg/m^3) in celulozna vlakna ($0,044 \text{ W/mK}$; 60 kg/m^3). Slednja so se izkazala za najboljšo izbiro, kar je razvidno v vseh polarnih diagramih (slika 6, 7, 8, 10). Ti proizvodi imajo sami po sebi zelo nizko gostoto in s tem primerno nizko toplotno prevodnost. Najslabše rezultate pa je izkazala pluta ($0,050 \text{ W/mK}$; 160 kg/m^3), ki smo jo zajeli v vseh smiselnih

konstrukcijskih sklopih (slika 6, 7, 10) z izjemo konstrukcijskega sklopa strehe. Med anorganskimi materiali sta bili najboljši steklina ($0,036 \text{ W/mK}$; 22 kg/m^3) in kamena ($0,040 \text{ W/mK}$; 70 kg/m^3) volna manjše gostote, medtem ko so volne večje gostote energetsko bolj potratne ($0,038 \text{ W/mK}$; 80 kg/m^3 , $0,045 \text{ W/mK}$; 155 kg/m^3), vendar jih je še vedno smiselno vgrajevati v toplotni ovoj (slika 6, 7, 8, 10). S stališča vsebovane energije je slabši material penjeno steklo ($0,060 \text{ W/mK}$;



Slika 9 • Vsebovana energija (MJ) toplotnoizolacijskih materialov konstrukcijskega sklopa terase manjše velikosti pri $U = 0,60 \text{ W/m}^2\text{K}$ v primerjavi z izgubljeno energijo (MJ)



Slika 10 • Vsebovana energija (MJ) toplotnoizolacijskih materialov konstrukcijskega sklopa terase manjše velikosti pri $U = 0,20 \text{ W/m}^2\text{K}$ v primerjavi z izgubljeno energijo (MJ)

170 kg/m³), kar je razvidno na slikah 7 in 10, vendar pa ima ta material kopico drugih pozitivnih lastnosti in ga je zato smiselno uporabiti pod določenimi pogoji (velika tlačna odpornost, izjemna odpornost proti vlagi in difuzijski pari).

Med novjšimi proizvodi se je za najboljši toplotnoizolacijski material izkazal aerogel (slike 6, 7, 10), ki se s stališča vsebovane energije lahko primerja s stekleno izolacijo večje gostote. Aerogel (0,017 W/mK; 140 kg/m³) kot izolacijski material predstavlja boljšo izbiro kot steklena volna, saj ga za enak učinek porabimo polovico manj (10 cm aerogela za 23 cm celuloznih vlaken), kar je razvidno v preglednici 3. Vakuumskoizolacijski paneli so se izkazali nekoliko slabše, saj jih

je upravičeno uporabiti le pod določenimi pogoji (slike 6, 7, 10). Ugotovili smo tudi, da vakuumskoizolacijskih plošč (VIP) energetsko ni smiselno vgrajevati v konstrukcijski sklop strehe (0,006 W/mK; 170 kg/m³), kar je razvidno na sliki 8 (poševna in ravna streha oz. terasa). Edina pozitivna lastnost VIP-plošč je izredno majhna toplotna prevodnost in s tem povezana izjemno majhna debelina izolacije (5 cm) za isti učinek toplotne izolativnosti, kar je tudi razvidno v preglednici 3.

Najbolj izstopajoči so bili rezultati konstrukcijskega sklopa terase manjše velikosti, ki skupaj ne presega 5 % površine strehe, kjer je dovoljena izjemno visoka toplotna prehodnost $U = 0,60 \text{ W/m}^2\text{K}$ (slika 9). Če namreč sledimo definiciji po zastavljeni osnovni predpostavki

o tretjini vsebovane energije v primerjavi s porabljeno energijo v tridesetih letih, lahko hitro ugotovimo, da bi bilo potrebno toplotno prehodnost močno zaostriti. Ugotovili smo, da bi morala biti toplotna prehodnost vsaj reda velikosti $U = 0,20 \text{ W/(m}^2\text{K)}$, pri čemer smo prvotni faktor $U = 0,60 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ zmanjšali za trikrat. Pri vseh drugih konstrukcijskih sklopih smo ta faktor zmanjšali samo za polovico (preglednica 1).

Pri sami izbiri toplotne izolacije in drugih konstrukcijskih materialov ter tehnologiji gradnje bi sicer morali upoštevati celovito analizo proizvoda oziroma celotnega okoljskega vpliva, izkazanega v enotah CO₂, in ne samo na podlagi vsebovane energije oziroma na podlagi ekonomske analize.

5 • SKLEP

Z analizo lahko potrdimo, da pluta kot izolacijski material na dolgi rok oziroma v času amortizacijske dobe ni primerna v nobenem konstrukcijskem sklopu. Vakuumskoizolacijski paneli, penjeno steklo in kamena volna večje gostote pa le na območju podnebja, identičnega Ratečam, in še to pod posebnimi pogoji (npr. majhna debelina toplotne izolacije, velika tlačna odpornost, cena itd.). Vsi drugi, v stavbeništvu izrazito razširjeni organski in anorganski materiali, katerih gostote se najbolj uporabljene v gradbeništvu, so s stališča energijskih razmerij primerni.

Največje odstopanje je bilo pri analizi terase manjše velikosti, kjer je največji dovoljen prehod toplote po pravilniku (RS, 2010) definiran zelo skopo, in sicer $U = 0,60 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Izkazalo se je, da so energijske izgube v dobi petih kurilnih sezon znatno večje, kot je celotna količina vsebovane energije izolacijskih materialov. Ko smo toplotno prehodnost sklopa zaostrili na $U = 0,30 \text{ W/m}^2\text{K}$, smo dobili znatno manjše energijske izgube. Šele pri toplotni prehodnosti $U = 0,20 \text{ W/m}^2\text{K}$ smo dosegli razmerje energij v skladu z osnovno predpostavko. Torej je bilo treba toplotno prehodnost zmanjšati za trikratnik, medtem ko je bilo pri vseh drugih konstrukcijskih sklopih toplotno prehodnost treba zmanjšati le za polovico, da je bil končni rezultat v skladu z osnovno predpostavko. Najverjetneje se je zakonodajalec odločil za tako ohlapno omejitev ($U \leq 0,60 \text{ W/m}^2\text{K}$) v primerih teras manjših velikosti zaradi večnih težav z višinami v

dotičnih konstrukcijskih sklopih, čeprav se hkrati zaveda, da je zahteva ni najboljša za varčevanje z energijo.

Strnemo lahko, da so okoljski vplivi v obliki vsebovane energije toplotnoizolacijskih gradbenih proizvodov v primerjavi z vsebovano energijo drugih gradbenih proizvodov, ki so vgrajeni v povprečni stavbi, majhni. Poleg tega je treba poudariti, da zaradi prihrankov energije ob namestitvi toplotnih izolacij (drastično zmanjšanje toplotnih izgub) ključno prispevajo k zmanjšanju vplivov stavb na okolje v celotni življenjski dobi stavb. Ker imajo nekateri materiali zelo dolgo dobo razgradnje in različno življenjsko dobo, bi bilo treba v prihodnosti dodatno raziskati in opraviti tudi celovite analize CO₂-ekvivalenta. Toplotne izolacije uvrščamo v sam vrh najučinkovitejših naložb za varčevanje z energijo in posredno v zmanjševanje vpliva na okolje (Kunič, 2012).

6 • VIRI

ARSO, Agencija Republike Slovenije za okolje, Potrošnja v gospodinjstvih 2014, http://kazalci.arso.gov.si/?data=group&group_id=12, pridobljeno 30. 7. 2014, 2014.

Crawford, R.H., Treloar, G.J., Validation of the use of Australian input output data for building embodied energy simulation, Eighth International IBPSA Conference, Eindhoven, Netherlands, 2003.

Crowther, P., Design for disassembly to recover embodied energy, The 16th Annual Conference on Passive and Low Energy Architecture, Melbourne/Brisbane/Cairns, Australia, 1999.

Dovjak, M., Krainer, A., A tool for the design of sustainable building concepts, v: Hauser, G. (ur.), Lützkendorf, T. (ur.), Essig, N. (ur.), Implementing sustainability – barriers and chance, Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 967–974, 2013.

Ecoinvent centre, Ecoinvent database, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, www.ecoinvent.ch, pridobljeno 7. 8. 2014, 2006.

GC ZRMK, Predpisi o toplotnih izgubah stavb, <http://gcs.gi-zrmk.si/Svetovanje/Clanki/PDFknjiznjicaAURE/IL2-02.PDF>, pridobljeno 21. 6. 2014, 2002.

- GC ZRMK, Toplotnoizolacijski materiali, <http://gcs.gi-zrmk.si/Svetovanje/Clanki/PDFknjiznjicaAURE/IL2-03.PDF>, pridobljeno 21. 6. 2014, 2003.
- Hammond, G., Jones, C., Inventory of Carbon and Energy (ICE), Sustainable Energy Research Team, Department of Mechanical Engineering, University of Bath, UK, <http://www.uea.ac.uk/~e680/energy/NBS-M016/ICE%20Version%201.6a.pdf>, pridobljeno 5. 8. 2014, 2008.
- IBO, Ökologie der Dämmstoffe, Österreichisches Institut für Baubiologie und ökologie, Donau Universität Krems, Zentrum für Bauen und Umwelt, Dunaj, Springer Verlag, 2000.
- Jenko, M., Analiza vsebovane energije v izbranih gradbenih proizvodih, diplomska naloga, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, samozaložba M. Jenko, 2014.
- JUS.U.J.5.600 – Tehnični pogoji za projektiranje in graditev stavb, 1980.
- KBOB, Empfehlung – Ökobilanzdaten im Baubereich, Bundesamt für Bauten und Logistik 2009/1 (BBL), Bern, <http://www.bbl.admin.ch/kbob/00493/00495/>, pridobljeno 4. 8. 2014, 2009.
- Koskela, L., Application of the new production philosophy to construction, Technical Report 72, California, USA, Stanford University, 1992.
- Kumar Dixit, M., Fernández-Solís, J.L., Lavy, S., Culp, C. H., Identification of parameters for embodied energy measurement, Energy and Buildings 42, 1238–1247, 2010.
- Kunič, R., Krainer, A., Energetska učinkovitost, varovanje okolja in celostno načrtovanje, Gradbeni vestnik 57, 6, 146–152, 2008.
- Kunič, R., Tavzes, Č., Kutnar, A., Ogljični odtis toplotnoizolacijskih materialov v toplotnem ovoju stavb, Gradbeni vestnik 61, 9, 206–214, 2012.
- Marušič, I., Celovita obnova toplotnega ovoja večstanovanjske stavbe na obali v pogledu ekonomike in ogljičnega odtisa, diplomska naloga, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo samozaložba I. Marušič, 2014.
- MOP, Ministrstvo za okolje in prostor, Tehnična smernica TSG-1-004:2010. 2013, Učinkovita raba energije, Ljubljana, http://www.arhiv.mop.gov.si/fileadmin/mop.gov.si/pageuploads/zakonodaja/prostor/graditev/TSG-01-004_2010.pdf, pridobljeno 15. 8. 2014, 2013.
- Papadopoulos, A.M., State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments, Energy and Buildings, 37, 77–86, 2005.
- Pullen, S., Holloway, D., Randolph, B., Troy, P., Energy profiles of selected residential developments in Sydney with special reference to embodied energy, Proceedings of the Australian and New Zealand Architectural Science Association, 40th Annual Conference, Challenge for architectural science in changing climate, Adelaide, Australia, 2006.
- REUS, Pozitivna energija, <http://www.pozitivnaenergija.si/raziskava/raziskava-reus/predstavitev-rezultatov>, pridobljeno 25. 7. 2014, 2013.
- RS, Pravilnik o učinkoviti rabi energije v stavbah, Ur. l. RS, št. 42/2002, 29/2004, 93/2008, 52/2010.
- SFRJ, Pravilnik o tehničnih ukrepih in pogojih za toplotno zaščito stavb, Ur.l. SFRJ, št. 35/1970.
- STO, Technisches Merkblatt, Sto-Polystyrol-Hartschaumplatte EPS 15/20, Sto AG, Niederglatt, www.sto-ag.ch, pridobljeno 7. 8. 2014, 2006.
- SURS, Statistični urad Republike Slovenije, Poraba goriv in energije v gospodinjstvih, Slovenija 2012, http://www.stat.si/novica_prikazi.aspx?id=5803, pridobljeno 30. 7. 2014, 2012.
- Tennenbaum, S.E., Network Energy Expenditures for Subsystem Production (MS), OCLC 20211746, Docket CFW-88-08, 1988.
- Venkatarama Reddy, B.V., Jagadish, K.S., Embodied energy of common and alternative building materials and technologies, Energy and Buildings, 35, 129–137, 2003.