

FAZNO SPREMENLJIVE SNOVI (PCM) IN NJIHOVA UPORABA V STAVBAH

PHASE CHANGE MATERIALS (PCM) AND THEIR APPLICATION IN BUILDINGS

asist. Luka Pajek, mag. inž. stavb.

luka.pajek@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, 1000 Ljubljana

prof. dr. Zvonko Jagličić, univ. dipl. fiz.

zvonko.jaglicic@fgg.uni-lj.si

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za matematiko in fiziko, Jamova 2, 1000 Ljubljana, in Inštitut za matematiko, fiziko in mehaniko, Jadranska 19, 1000 Ljubljana

Znanstveni članek

UDK 536.63:699.866"322"

Povzetek | Vse pogostejše opažamo, da je v poletnih mesecih brez uporabe klimatskih naprav v novejših stavbah neprijetno vroče. Za to obstaja vrsta razlogov, pri čemer je eden izmed njih zagotovo nezadostna toplotna kapaciteta konstrukcijskih sklopov. Ena rešitev problema je uporaba fazno spremenljivih snovi, znanih tudi pod okrajšavo PCM (angleško Phase Change Material). Z njimi povečamo toplotno kapaciteto konstrukcijskega sklopa ob zanemarljivem povečanju njegove mase, s tem pa izboljšamo toplotno ugodje v notranjem okolju. Pregled literature je pokazal, da je v zadnjem desetletju močno naraslo število raziskav, ki obravnavajo lastnosti PCM, in število izdelkov s PCM za uporabo v stavbah. V prispevku smo z enostavnim izračunom pokazali, da lahko že s tanko plastjo PCM ustvarimo razmere, ki nam ugajajo v stavbah z večjo toplotno kapaciteto. Pri tem moramo paziti, da ima PCM tališče pri temperaturi, okoli katere se najpogostejše dnevno spreminja temperatura zraka. Predstavili smo nekaj primerov različnih vrst fazno spremenljivih snovi in primerov njihove uporabe v gradbenih proizvodih. Fazno spremenljive snovi imajo največji učinek, če jih vgradimo v sloj konstrukcije, ki je čim bližje notranjosti, saj imajo tako hiter odzivni čas, ki je kos dnevnim spremembam temperature. Pomembno je tudi, da jih ne obdamo z materiali nizke toplotne prevodnosti.

Ključne besede: toplotna kapaciteta, fazno spremenljive snovi, PCM

Summary | The occurrence of thermal discomfort in new buildings without air conditioning during summer is becoming a common phenomenon. There are many possible reasons for this condition, one of them definitely being insufficient thermal capacity of building elements. Such overheating of buildings can be mitigated by using phase change material (PCM). PCM is used to considerably increase the thermal capacity of the construction, by only slightly increasing its mass. In such manner, indoor thermal comfort in buildings is improved. A comprehensive literature review showed that in the last decade the number of scientific papers dealing with the application of PCMs in buildings and the number of construction products with incorporated PCM has escalated. By using an elementary calculation, we showed how even a thin layer of PCM may contribute to improved thermal comfort. However, the melting temperature of PCM must be chosen within daily temperature fluctuations. Furthermore, we presented several types of PCMs and a number of examples how PCMs can be used in buildings. Phase change materials have the greatest efficiency, when they are integrated in the innermost part of the construction. This is how they can quickly respond to temperature fluctuations. In addition, it is important that PCM is not covered by any material having low thermal conductivity.

Key words: heat capacity, phase change materials, PCM

1 • UVOD

Pomislimo na obisk srednjeveškega gradu ob vročem poletnem dnevu. Med ogledom razstave uživamo v prijetnem hladu grajskih prostorov. Ti največkrat niti niso hlajeni s klimatskimi napravami. Zakaj je tako, če pomislimo, da je ob enakih zunanjih pogojih in brez uporabe klimatskih naprav v novejših stavbah neprijetno vroče? Za takšno obnašanje obstajata dva poglobljena razloga: praviloma veliko manjši delež steklenih površin v ovoj starih kamnitih stavb in veliko večja toplotna kapaciteta sten starih objektov. V sodobnih stavbah so v slabšem položaju predvsem stavbe in konstrukcijski sklopi, ki imajo lahko nosilno konstrukcijo, npr. leseno, jekleno, tudi skeletno armiranobetonsko ipd. Če takšnim konstrukcijam želimo izboljšati toplotno kapacitivne lastnosti, lahko dodajamo sloje (priporočljivo na notranjo stran) materiala z večjo termično maso, npr. dodamo opečno polnilo v armiranobetonski skelet. Poleg tega lahko toplotno kapaciteto stavbe povečamo tudi z uporabo notranjih oblog ali drugih proizvodov

z večjo toplotno kapaciteto. V tem prispevku bomo obravnavali vpliv toplotne kapacitete konstrukcijskih sklopov, bodisi sten ali horizontalnih konstrukcij, na temperaturno ugodje v stavbah. Predvsem pa bomo opisali, kako lahko s fazno spremenljivo snovjo povečamo toplotno kapaciteto konstrukcijskih sklopov oz. prostora, ne da bi morali znatno povečati debelino slojev.

Fazno spremenljiva snov ali angleško *Phase Change Material* (v nadaljevanju bomo uporabljali okrajšavo PCM) je snov, pri kateri lahko pri prehodu toplote skozi le-to pride do spremembe agregatnega stanja. V stavbarstvu imajo praviloma tovrstne snovi tališče v območju ambientalnih temperatur (20–30 °C). Med taljenjem ali strjevanjem fazno spremenljive snovi ta shrani oz. sprosti veliko količino toplote (latentna oz. talična toplota) na račun svoje notranje energije, ne da bi se pri tem spremenila njena temperatura. Fazno spremenljive snovi spadajo med enostavne,

zanesljive in tudi trajne načine shranjevanja toplote. Zato se je njihova uporaba v zadnjem času, predvsem v gradbeništvu in strojništvu, močno povečala. Poznamo več vrst fazno spremenljivih snovi. Bolj znani so predvsem razne hidratizirane soli ($X \cdot nH_2O$) in parafini (C_nH_{2n+2}). Zaradi različnih snovnih lastnosti (npr. različne temperature tališča, različne specifične talične toplote) niso vsi izmed njih enako uporabni. Slednje je pomembno zlasti pri izbiri ustreznega tipa PCM za uporabo v stavbarstvu, kjer takšne snovi pripomorejo k uravnavanju notranjih temperatur zraka in površinskih temperatur, kar nam omogoči udobnejše notranje toplotno okolje. Zaradi velikega števila možnih snovi, ki jih lahko uporabljamo kot PCM, je namen članka raziskati, katere materiale lahko uporabljamo kot PCM v stavbah, kako se vgrajujejo in kakšne so njihove glavne lastnosti. Pri tem sta nas zanimala predvsem temperatura tališča in specifična talična toplota, posredno tudi njihova gostota in toplotna prevodnost. Želene podatke smo pridobili s pomočjo izračunov in z obširnimi pregledom relevantne znanstvene literature. Rezultati služijo kot podlaga za nadaljnje raziskave na področju uporabe PCM v stavbah.

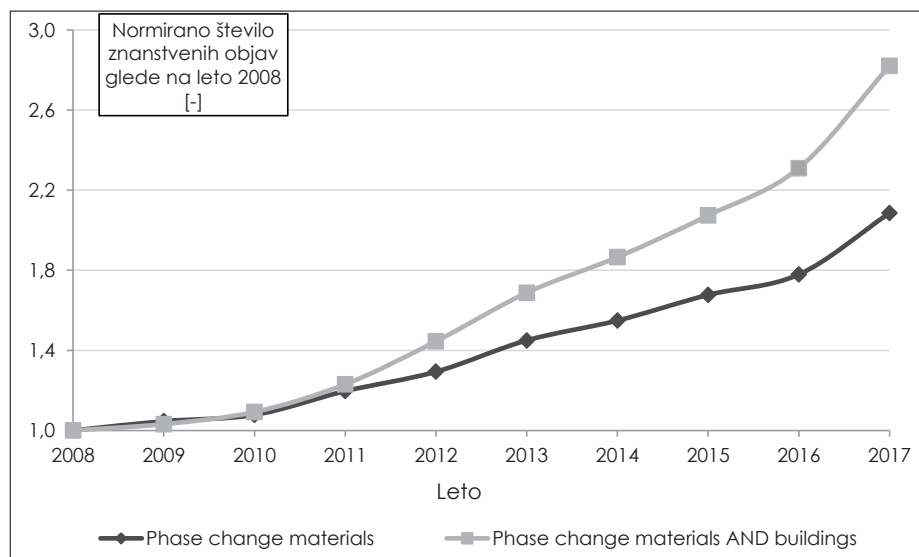
2 • RAZISKANOST PODROČJA

Za namen pričujoče raziskave smo preiskali znanstvene prispevke z vsebino o fazno spremenljivih snoveh. Še posebej smo se osredotočili na uporabo fazno spremenljivega materiala v gradbeništvu. Sistematični pregled literature smo opravili v iskalnih bibliografskih bazah podatkov, kot so *Science Direct*, *Web of Science*, *Cobiss* in *The Internet Public Library*. Pregledali smo relevantno literaturo, objavljeno med letoma 1987 in 2018. Ugotovili smo, da je večina literature o PCM dostopne v obliki znanstvenih publikacij, predvsem znanstvenih člankov, manj pa je monografij. Pod zadetke v obliki spletnih strani lahko uvrstimo predvsem spletne strani različnih proizvajalcev gradbenih materialov, ki ponujajo izdelke v obliki PCM, katerih ponudba je v zadnjem času v izrazitem porastu. Po pregledu slovenske zakonodaje pa smo ugotovili, da ne vsebuje neposrednih predpisov in navodil za uporabo fazno spremenljivega materiala v gradbeništvu.

S pomočjo spletne baze periodičnih publikacij *Science Direct* smo preučili popularnost PCM

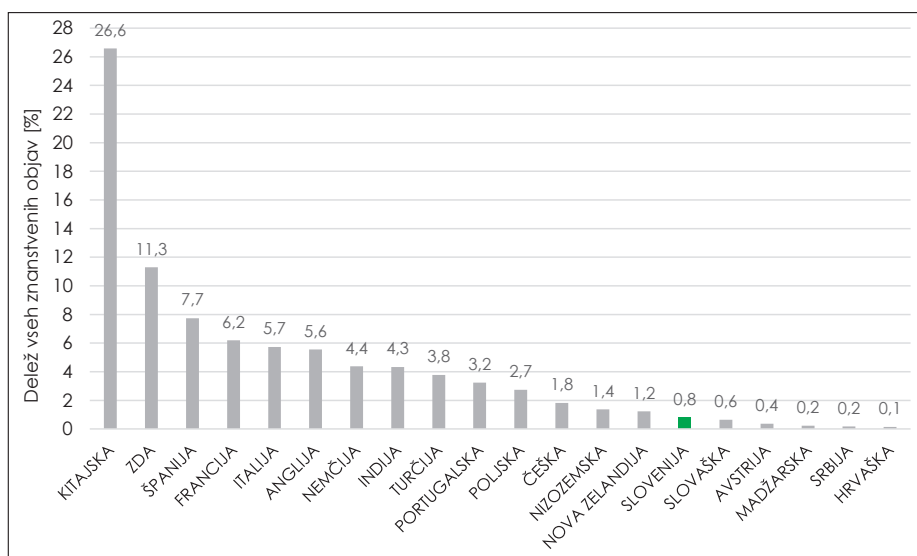
med letoma 2008 in 2017 (zadnjih 10 let), tako da smo analizirali število posameznih znanstvenih objav v tem obdobju za vsako leto posebej. Uporabili smo dva različna

iskalna niza, in sicer »Phase change materials OR PCM«, ki je podal znanstvene publikacije na splošno o fazno spremenljivih snoveh, in drugi iskalni niz »Phase change materials OR PCM AND buildings«, ki je podal rezultate o raziskavah in uporabi fazno spremenljivih snovi na področju stavb. Rezultati so prikazani na sliki 1.



Slika 1 • Normirano število znanstvenih objav na temo fazno spremenljivih snovi z različnim iskalnim nizom v bibliografski bazi podatkov *Science Direct* med letoma 2008 in 2017.

Za izbrani iskalni niz »Phase change materials OR PCM« je v bazi podatkov Science Direct zavedenih 72.164 znanstvenih publikacij z objavo v letu 2008, za iskani niz »Phase change materials OR PCM AND buildings« pa 8.966. Za leto 2017 sta ustrezni števili enaki 150.547 za prvi iskalni niz in 25.296 za drugi. Vendar če pogledamo normirano število objav, ki jih najdemo s posameznim iskalnim nizom (slika 1), vidimo, da število objav na temo uporabe fazno spremenljivih snovi v stavbah (»Phase change materials AND buildings«) v zadnjih letih narašča občutno hitreje kot število publikacij, ki tematiko obravnavajo na splošno. Lahko sklepamo, da popularnost PCM v gradbeništvu v zadnjih letih močno narašča. Razlogi za to so naraščanje števila različnih snovi, ki se lahko uporabljajo kot PCM, dostopnejša cena in velika uporabnost vgradnje takšnih snovi v stavbe. Slika 2 prikazuje geografsko porazdelitev znanstvenih objav (oz. njihovih avtorjev) na področju uporabe PCM v gradbeništvu. Opažamo, da večji delež raziskav poteka na območju Kitajske in



Slika 2 • Za izbrane države prikazana geografska porazdelitev avtorjev znanstvenih objav na področju uporabe PCM v gradbeništvu glede na število vseh znanstvenih objav na tem področju.

ZDA. Od evropskih držav prednjačijo Španija, Francija, Italija in Anglija. Slovenija ima glede na število prebivalcev relativno visok delež

znanstvenih objav na tem področju, pri čemer je tudi znanstveno uspešnejša od sosednjih držav (razen od Italije).

3 • O FAZNO SPREMENLJIVIH SNOVEH

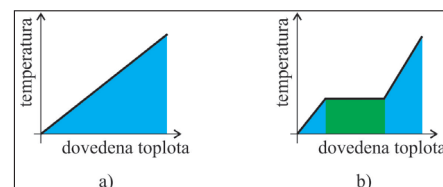
Najdlje uporabljana in človeku najbolj poznana fazno spremenljiva snov je led (voda). Ljudje ga pogosto uporabljamo za hlajenje hrane, pijač in prostorov. Prav led pa je tudi najstarejša poznana uporaba fazno spremenljivega materiala v gradbeništvu, saj so ga prebivalci arktičnih dežel že od nekdaj uporabljali pri gradnji iglujev (Košny, 2015). Led je v tem primeru kot lupina bivalnega prostora služil za nosilno konstrukcijo, toplotno izolacijsko plast (blaženje toplotnega toka zaradi prevajanja in sevanja) in za hranilnik energije, zato je imel kot gradbeni material pomembno funkcijo pri uravnavanju toplotnega okolja. Ledena lupina je zagotavljala tudi zadostno zvočno izolacijo, hkrati pa je podnevi kot prosojna površina prepuščala zadovoljiv delež svetlobe. Zanimiva je vzporednica z novimi raziskavami uporabe vode oz. ledu za ovoj stavb, namenjenih naselitvi na Marsu, Luni ali drugih planetih, kjer bi plast ledu, poleg naštetih prednosti, tudi učinkovito ščitila notranjost stavbe pred škodljivimi (kozmičnimi) sevanji (NASA Langley Research Center, 2017). V omenjenem razvojnem projektu sodeluje tudi slovensko podjetje Duol (Duol, 2016). Koncept talilne toplote in specifične toplote, povezane s segrevanjem snovi, je približno na polovici 18. stoletja podrobno raziskoval škotski znanstvenik Joseph Black

(Košny, 2015). Z razvojem znanosti, tehnologije in eksperimentalne opreme je bil v dvajsetem stoletju omogočen natančnejši vpogled v obnašanje snovi pri prehodu iz kapljevinske faze v trdno fazo in obratno. V gradbeništvu tovrstni material pogosteje uporabljamo približno od sredine 20. stoletja. Prvi primer uporabe PCM v stavbarstvu je dokumentiran v letu 1948 v stavbi v ameriški zvezni državi Massachusetts kot del zunanega zidu, ki je bil namenjen zajemu sončne energije (Frynsinger, 1987).

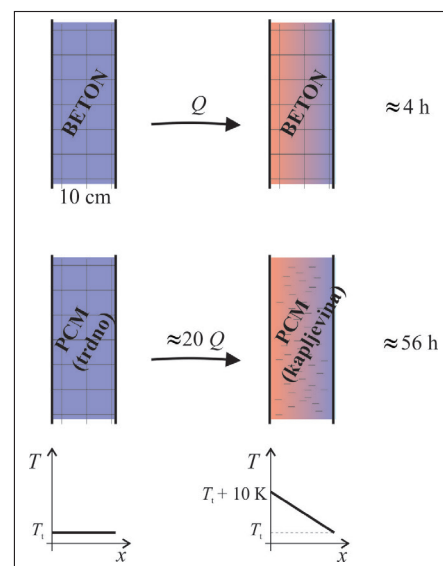
Ko snovi dovajamo toploto, sta možna dva procesa:

- Snovi narašča temperatura (slika 3a). Dovedena toplota Q je enaka $Q = m c_p \Delta T$, pri čemer je m masa snovi in c_p njena specifična toplota. Ker sprememba temperature občutimo s čutili, toploto Q pravimo tudi **senzibilna toplota**;
- Snovi se spremeni agregatno stanje, temperatura se ne spreminja (slika 3b). Dovedena toplota (**latentna toplota**) je enaka produktu mase snovi in specifične talilne toplote: $Q = m q_f$.

Fazno spremenljive snovi lahko »skladiščijo« (akumulirajo) tako senzibilno kot tudi latentno toploto.



Slika 3 • Primerjava različnih načinov skladiščenja toplote v obliki notranje energije v snovi. (a) Senzibilna toplota, (b) latentna toplota.



Slika 4 • Segrevanje 10 cm debele betonske stene in enako debele plasti PCM po spremembi temperature 10 K na eni strani stene.

Ocenimo razliko med senzibilno in latentno toploto z zgledom, narisanim na sliki 4. Primerjamo obnašanje 10 cm debele plasti betona z enako debelo plastjo PCM, ki je v trdni fazi. Naj bosta obe plasti na začetku pri temperaturi tališča PCM T_f . Potem na eni strani naglo povišamo temperaturo za $\Delta T = 10$ K, medtem ko na drugi strani vzdržujemo začetno temperaturo. Počakajmo, da se znova vzpostavi stacionarno stanje.

Toplota, preračunana na površino stene, ki jo pri tej spremembi akumulira plast betona, je $\frac{Q_{\text{(beton)}}}{S} = \frac{1}{2} d \rho_{\text{(beton)}} c_{p(\text{beton})} \Delta T = \frac{1}{2} \cdot 0,1 \text{ m} \cdot 1800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 960 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \cdot 10 \text{ K} \approx 1 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2}$. (1)

S faktorjem $1/2$ upoštevamo, da se v povprečju plast segreje za polovico temperaturne razlike ΔT .

PCM se mora pri enaki temperaturni spremembi najprej staliti. Šele kapljevinasta se potem lahko ogreje za ΔT . Akumulirano toploto izračunamo kot vsoto obeh prispevkov

$$\frac{Q_{\text{(PCM)}}}{S} = d \rho_{\text{(PCM)}} q_{t(\text{PCM})} + \frac{1}{2} d \rho_{\text{(PCM)}} c_{p(\text{PCM})} \Delta T = 0,1 \text{ m} \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 2 \cdot 10^5 \frac{\text{J}}{\text{kg}} + \frac{1}{2} \cdot 0,1 \text{ m} \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 3000 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \cdot 10 \text{ K} = 20 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2} + 1,5 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2} \approx 22 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2}. \quad (2)$$

Upoštevati smo tipične vrednosti snovnih konstant za voske, ki jih uporabljajo kot PCM. Vidimo, da k akumulirani toploti prispeva največ talična toplota in da je celotna akumulirana toplota v PCM veliko večja kot v betonu.

Prav tako se z uporabo PCM znatno poveča karakteristični čas, v katerem dosežemo novo stacionarno stanje. Tega lahko pri segrevanju betona ocenimo kot (Peternelj in Jagličić, 2014):

$$\tau_{\text{(beton)}} = \frac{d^2}{\chi} = \frac{(0,1 \text{ m})^2}{0,64 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}} = 4,3 \text{ h}, \quad (3)$$

kjer je χ termična difuzivnost betona. Čas taljenja plasti PCM pa lahko v kvazistacionarnem približku (Peternelj, 2014) ocenimo na

$$\tau_{\text{(PCM)}} = \frac{\rho_{\text{(PCM)}} q_{t(\text{PCM})}}{2 \lambda_{\text{(PCM)}} \Delta T} d^2 = \frac{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 2 \cdot 10^5 \frac{\text{J}}{\text{kg}}}{2 \cdot 0,5 \frac{\text{W}}{\text{m K}} \cdot 10 \text{ K}} \cdot (0,1 \text{ m})^2 \approx 56 \text{ h}. \quad (4)$$

Vidimo, da sta tako akumulirana toplota kakor karakteristični čas v plasti PCM za red velikosti večja od istih količin v enako debeli plasti

betona. To pomeni, da lahko že s tanko plastjo PCM »ponaredimo« razmere, ki nam zaradi debelih sten ugajajo v srednjeveških zgradbah. Le paziti moramo na to, da ima PCM tališče pri temperaturi, okoli katere se (najpogosteje) spreminja dnevna temperatura. Poleg tega pa se moramo zavedati, da sprememba agregatnega stanja lahko predstavlja tehnološki izziv uporabe materiala. Sprememba agregatnega stanja PCM je običajno povezana tudi s spremembo prostornine snovi. Konstrukcija zato lahko izgubi celovitost ali pa PCM v kapljevinastem agregatnem stanju preprosto izteče. Načrtovalci in proizvajalci se s tem v glavnem spopadajo tako, da PCM zaprejo in ujamejo v neprepustne in za spremembo prostornine neobčutljive kapsule oz. v sloj, iz katerega PCM ne more iztekati.

V večini primerov v stavbah uporabljamo PCM, ki spremeni agregatno stanje iz trdnega v kapljevinasto, saj pri spremembi v plinasto stanje močno naraseta prostornina ali tlak, če plin držimo v zaprtem prostoru. Možna je tudi sprememba iz trdne faze v trdno fazo. Zaradi spremembe v razporeditvi molekul v snovi ob dovajanju toplote (Fallahi, 2017) pride do spremembe notranje energije snovi. Žal so te snovi manj ognjevarne in dražje ter se za zdaj v večji meri ne uporabljajo, čeprav imajo velik potencial za uporabo (Qian, 2015).

Glavna koristna lastnost PCM je, da zaradi zgoraj opisanih značilnosti lahko nastopajo kot napredni gradbeni material pri uravnavanju notranjega okolja v stavbah (blaženje temperaturnega nihaja). To zlasti velja pri stavbah, ki so poleti nagnjene k pregrevanju in imajo majhno maso v konstrukcijskih sklopih znotraj toplotnega stavbnega ovoja, npr. montažne, predalčne ali skeletne stavbe (Pajek, 2017). V stavbah PCM lahko uporabljamo kot del pasivnega ((Akeiber, 2016), (Pajek, 2017), (Sharifi, 2017)) ali pa aktivnega ((Stritih, 2017), (Stritih, 2011)) načina hlajenja

in ogrevanja oz. dušenja velikih temperaturnih nihanj. Torej poznamo dve tehniki, kako PCM v gradbeništvu uporabiti za izboljšanje obratovanja stavb. Pri uporabi PCM v kombinaciji z aktivno tehniko za fazno spremembo v eno smer (npr. iz kapljevinaste faze v trdno fazo) uporabimo konvencionalni hladilni sistem, ki ga vključimo v času nižje cene energenta. Pri vračanju v prvotno agregatno stanje potem PCM »zastonj« uravnava notranjo temperaturo zraka oz. hitrost prehoda toplote skozi konstrukcijski sklop. Pri pasivni tehniki funkcijo aktivacije in deaktivacije fazno spremenljivih snovi načeloma opravlja le temperaturna razlika zraka med dnevom in nočjo.

Najpogostejše PCM delimo v skupine glede na izvor, in sicer na organske, anorganske in evtektike (Anisur, 2013). V preglednici 1 je predstavljenih nekaj skupin fazno spremenljivih snovi, ki imajo potencial za uporabo, ter njihove glavne lastnosti. Pri slednjih smo se osredotočili predvsem na glavni fizikalni lastnosti, ki nas zanimata, to sta temperatura tališča in talična toplota. Poleg navedenega sta nas zanimala tudi tip materiala (organski, anorganski, evtektik) in primerjava cen. Za uporabo v gradbeništvu je pomembna predvsem temperatura tališča, saj mora ta biti znotraj temperatur, ki se običajno pojavljajo v stavbah, torej 20–30 °C (Akeiber, 2016). Vse od v preglednici 1 naštetih snovi imajo tališče znotraj omenjenih temperatur, vendar je to odvisno od različice materiala (Akeiber, 2016). Primer kovine, ki se uporablja kot PCM, je galij (Ga). Njegovo tališče je pri okrog 30 °C. Seveda poleg v preglednici 1 navedenih obstaja še več fazno spremenljivih snovi, kot so na primer glicerol, polietilen glikol, tetradodekanol in podobno, a so redkeje uporabljane.

Anorganski PCM so načeloma v primerjavi z organskim cenejši in manj vnetljivi, vendar pa je slaba stran anorganskih PCM velika masa, pomanjkanje termične obstojnosti (razpadajo

Ime skupine	Tip PCM	Temperatura tališča (°C)	Talična toplota (kJ/kg)	Cena
parafini	organski	–12 do 71	190 do 260	srednje drag
maščobne kisline	organski	7,8 do 187	130 do 250	2–3-krat dražji od parafina
hidratizirane soli	anorganski	11 do 120	100 do 200	nižja cena
kovine	anorganski	30 do 96	25 do 90	drag
evtektiki	evtektik	4 do 93	100 do 230	drag

Preglednica 1 • Pregled najpogostejše uporabljenih in najdostopnejših skupin fazno spremenljivih snovi ter njihove lastnosti ((Ascione, 2014), (Biswas, 2014), (Kuznik, 2011), (Rathod, 2013), (Sharma, 2009), (Ye, 2014), (Zhou, 2014))



Slika 5 • Parafin (levo) in hidratizirana sol (desno) pri sobni temperaturi (povzeto po (Evers, 2010)).

pri višjih temperaturah) ter možnost korozije in razpada materiala, ki je pri organskih občutno manjša. Pri kovinah je slaba lastnost predvsem nizka talilna toplota na enoto mase (preglednica 1). Akeiber in sodelavci (Akeiber, 2016) so v preglednem članku ugotovili, da se v splošnem kot PCM najpogosteje uporablja parafin (primer na sliki 5), predvsem zaradi njegovih ugodnih termičnih lastnosti (visoka talilna toplota), cene, materialne obstojnosti in odpornosti proti koroziji. Njegove slabe lastnosti so vnetljivost, velika temperaturna odvisnost prostornine ter predvsem nizka toplotna prevodnost, ki v primeru PCM lahko pomeni slabši dinamični (s časom spremenljivi) toplotni odziv. Čeprav tudi ostali PCM izkazujejo solidne lastnosti (npr. hidratizirane soli, glej sliko 5), je njihova uporaba v gradbeništvu redkejša.

Navedene fazno sprejemljive snovi se lahko v splošnem uporabljajo v dveh različnih oblikah, bodisi kot samostojna plast v stavbnem ovojju (zunanje stene, strehe, tla) ali pa kot kapsulirani delci (PCM je shranjen v majhne kapsule) znotraj drugega materiala. Primeri uporabe obeh možnosti so prikazani v poglavju 4.

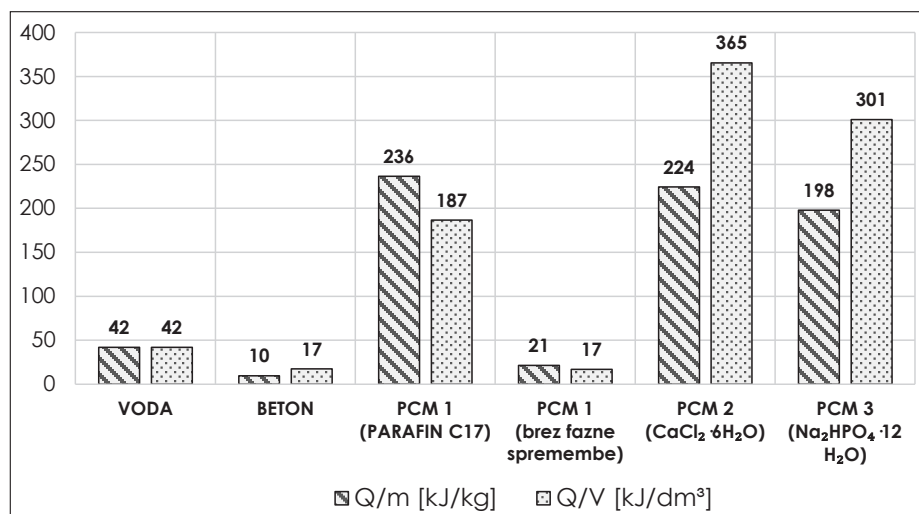
V gradbeništvu moramo pri izbiri ustreznega materiala, ki ga želimo uporabiti kot PCM, upoštevati več kriterijev, med katere spadajo predvsem ustrezne termodinamične, tehnične in kemične lastnosti, ob upoštevanju ekonomskih kriterijev (dostopna cena) (Kocjančič,

2011). Vse te lastnosti, predvsem to velja za temperaturo tališča, izberemo glede na podnebje, vremenske razmere, vrsto stavbe ipd. V glavnem pa imamo v mislih, da bi radi pri želeni temperaturi shranili oz. sprostili večjo količino toplote, kar nam ob manjši prostornini omogoča boljši in predvsem cenejši nadzor nad notranjimi temperaturami (npr. preprečevanje pregrevanja stavb).

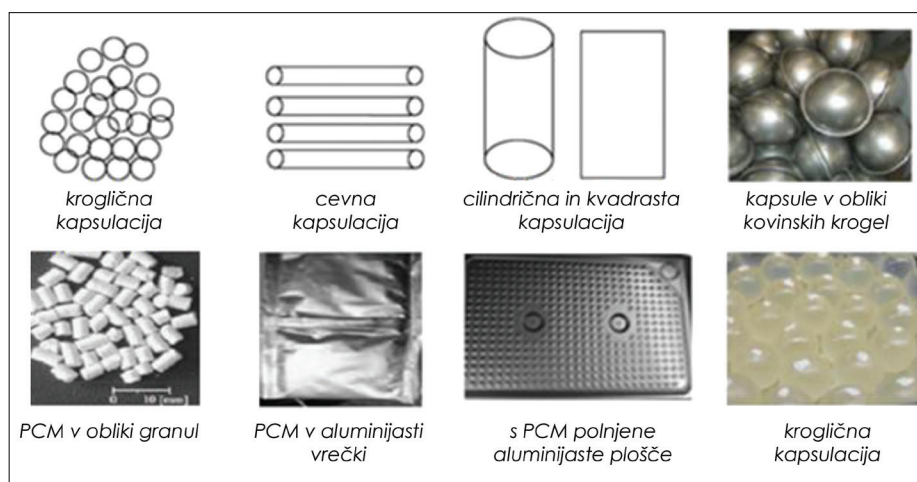
S primerom na sliki 4 smo s pomočjo enačb (1) in (2) pokazali, da v enako debeli plasti PCM in betona v PCM shranimo približno 20-krat več toplote. V primerih večjih debe-

lin moramo biti pozorni, saj je sodelovanje celotne mase in s tem toplotne kapacitete konstrukcijskih sklopov ob hitrih temperaturnih spremembah lahko oteženo (Kunič, 2017). Na sliki 6 lahko opazujemo potrebno toploto za spremembo temperature v različnem materialu za 10 K oz. 10 °C. Izračunali smo potrebno toploto za primer vode, betona z gostoto 1800 kg/m³ in tri različne tipe fazno spremenljive snovi. PCM 1 predstavlja parafin C17, PCM 2 in 3 pa hidratizirani soli kalcijev klorid heksahidrat (CaCl₂·6H₂O) ter natrijev hidrogenfosfat dodekahidrat (Na₂HPO₄·12H₂O). Na sliki 6 lahko vidimo tudi primerjavo med PCM 1, v katerem nastopi fazna sprememba snovi, in PCM 1, v katerem se takšna sprememba ne zgodi. Slednje se odraža v velikih razlikah (praktično kar 11-krat) med potrebnimi toplotami za segrevanje snovi. Večinoma lastnosti PCM podajamo v enotah shranjene energije na enoto mase. Iz grafa na sliki 6 pa razberemo, da se razmere nekoliko spremenijo, če primerjamo vrednosti shranjene energije, normirane na enoto prostornine. Ker ima parafin manjšo gostoto od vode, je razmerje shranjene energije na enoto prostornine v parafinu s fazno spremembo in v vodi (4,5 proti 1) nekoliko manjše kakor razmerje iste količine, preračunane na enoto mase (5,6 proti 1), a še vedno izredno veliko. Parafinova nižja gostota je lahko povezana tudi z manjšo toplotno prevodnostjo, ki neugodno vpliva na učinek PCM. Obratno je moč opaziti pri preostalih dveh PCM (PCM 2 in PCM 3 na sliki 6).

Pri fazno spremenljivih snoveh je zelo pomembno tudi, da je proces taljenja in strjevanja reverzibilen in ciklično stabilen. To pomeni, da mora imeti material veliko stopnjo ponovljivosti



Slika 6 • Potrebna toplota za segrevanje različnih materialov za 10 K, pri čemer se v primeru PCM-jev med segrevanjem zgodi fazna sprememba. Segrevanje poteka v območju sobnih temperatur.

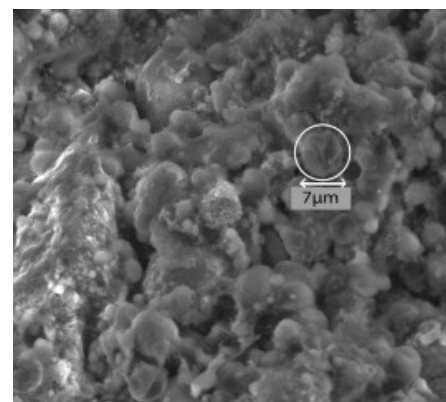


Slika 7 • Različne oblike in metode, uporabljane pri mešanju PCM z drugim materialom (povzeto po (Thambidurai, 2015)).

ciklov, brez večjih sprememb lastnosti snovi v predvideni življenjski dobi, ki je v primeru stavb več desetletij. V gradbeništvu se fazno spremenljive snovi v splošnem pojavljajo v dveh glavnih oblikah, in sicer kot samostojen material oz. sloj ali kot kapsule, primešane v drugi material, npr. apno, cement, mavec, gli-

no in podobno. Pri tem poznamo več različnih vrst kapsul in drugih načinov vgrajevanja in mešanja PCM v drugi material (slika 7).

Slika 8 prikazuje fotografijo, posneta z vrstičnim elektronskim mikroskopom (SEM), na njej pa je razvidna povečava mikrokapsul



Slika 8 • SEM-fotografija 3-odstotne masne mešanice mikrokapsul PCM in cementne malte. S krogom sta označena lokacija in premer kapsule PCM (povzeto po (Desai, 2014)).

PCM v matrici cementa. Mikrokapsule so v tem primeru velikosti okoli 7 μm in skupno predstavljajo 3 % masnega deleža v celotni mešanici. S podatki, uporabljenimi v enačbah 1 in 2, lahko izračunamo, da v takšni mešanici PCM skupno toplotno kapaciteto mešanice povečamo za okoli 25 %.

4 • PRIMERI UPORABE PCM V STAVBAH

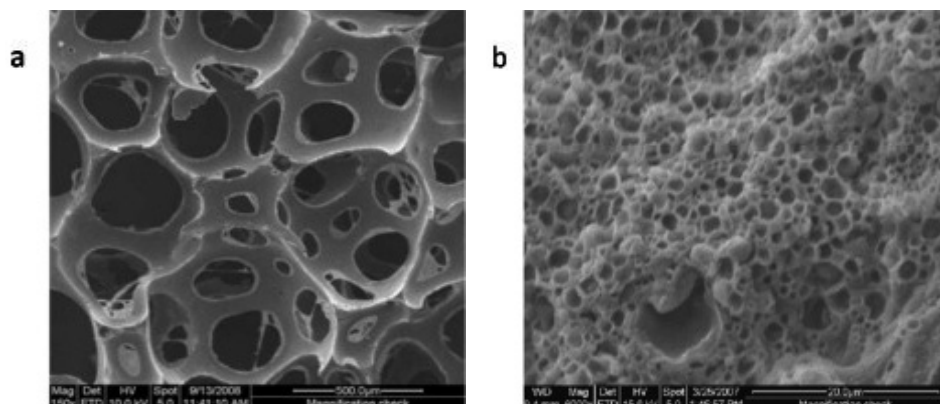
Opisali bomo nekaj primerov uporabe PCM v stavbah s poudarkom na pasivnih sistemih – torej sistemih, ki za delovanje ne potrebujejo aktivnega hlajenja ali ogrevanja (npr. hladilnikov, ogrevalnih, ohlajevalnih in klimatskih naprav).

Kot smo lahko prebrali v poglavju 3, je možno kapsule PCM primešati različnemu drugemu gradbenemu materialu. Na sliki 8 smo lahko

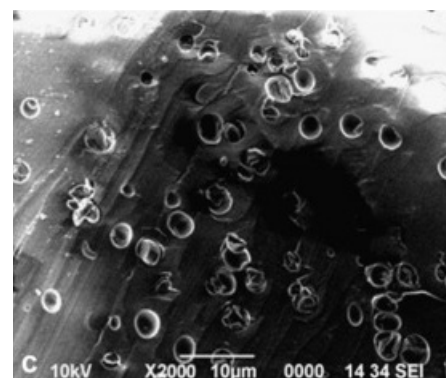
videli primer mešanja PCM s cementno malto, ki jo lahko uporabimo za notranje omete v stavbah. Podobno lahko PCM vmešamo tudi v beton (Desai, 2014). Pri tem je najpomembnejše, da s takšnimi mešanicami ne poslabšamo mehanskih lastnosti betona in da na račun PCM le dodatno povečamo specifično toplotno kapaciteto konstrukcije. Desai in sodelavci (Desai, 2014) so v tem

primeru poudarili zanimivo dejstvo, da takšne kapsule PCM betonu zmanjšajo gostoto, kar zmanjša težo in potencialno izboljša mehanske lastnosti konstrukcije, vendar so na tem področju potrebne nadaljnje raziskave.

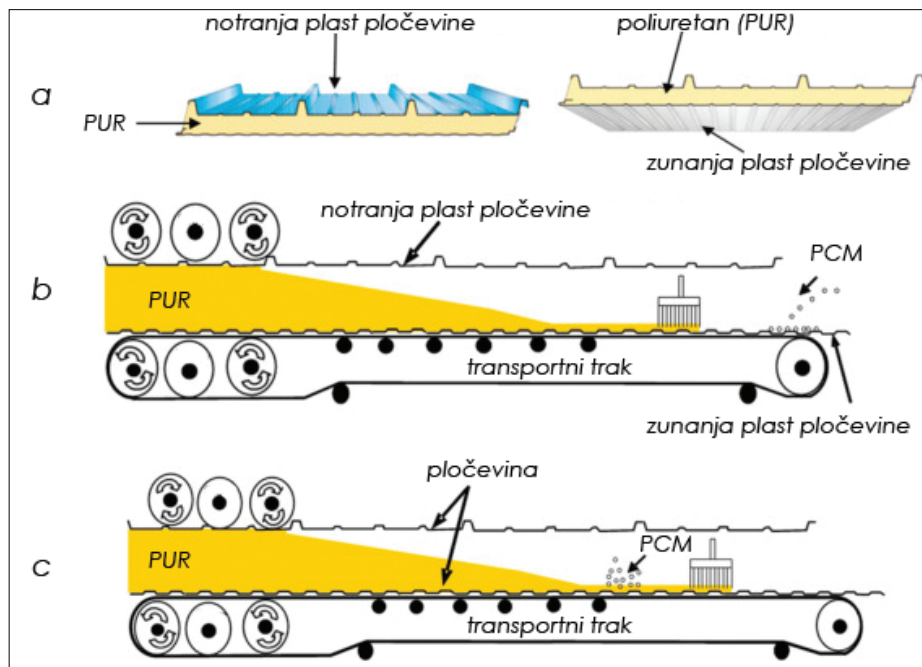
Podobno kot mešanje PCM z betoni in maltami lahko mikrokapsule primešamo tudi različnim toplotnoizolacijskim materialom. Postopek so predstavili Yang in sodelavci (Yang, 2015), ki so kapsule PCM pomešali s poliuretansko peno (slika 9). V splošnem se raziskovalci na tem področju ukvarjajo



Slika 9 • Fotografija SEM poliuretanske pene, ki vsebuje mikrokapsule PCM (n-oktadecana) z (a) St-DVB polimerom kot materialom za lupino kapsule in (b) melamin-formaldehidnimi kopolimeri kot lupino kapsule (povzeto po (Yang, 2015)).



Slika 10 • Fotografija SEM poliuretanske pene, ki vsebuje 22,6 % masne frakcije myristyl myrystata (povzeto po (Aydin in Okutan, 2013)).



Slika 11 • (a) Videz sendvič panela. (b) in (c) Izdelava sendvič panela na dva različna načina (povzeto po (Castellón, 2010)).

predvsem s postopki sinteze in izdelave takšnih materialov ter njihovo toplotno kapaciteto, manj pa z drugimi pomembnimi termičnimi lastnostmi, kot je na primer toplotna prevodnost. Ta bi lahko v primeru mešanice PCM in toplotne izolacije (npr. poliuretana) predstavljala slabost, saj nizka toplotna prevodnost toplotne izolacije upočasni prehod toplote in posledično upočasni odziv PCM. Aydin in Okutan (Aydin, 2013) sta pokazala, da se lahko tudi nekapsulirane oblike različnih PCM (estri maščobnih kislin – npr. myristyl myristate) dobro zmešajo s polimernimi materiali, kot je poliuretan. V tem primeru so se delci myristyl myristata v matrici učinkovito prepletli z zamreženimi polimeri, razporeditev pa je bila homogena (slika 10).

Castellón in sodelavci (Castellón, 2010) so v okviru industrijske linijske proizvodnje preučevali vgradnjo PCM v obliki mikrokapsul (Micronal BASF) v t. i. sendvič panele iz poliuretanske pene in pločevine, da bi s fazno spremenljivimi materiali izboljšali toplotno kapaciteto takšnih panelov (slika 11). Pri tem so za proizvodnjo panelov uporabljali tri različne metode. V prvem primeru so mikrokapsule zmešali z eno od komponent poliuretana. V drugih dveh primerih pa so kapsule dodajali ali tik pred injiciranjem poliuretana med dve plasti pločevine (slika 11b) ali pa takoj po njem (slika 11c). V prvem primeru, ko so bile kapsule PCM

primešane komponentam poliuretana, se je zaradi njihove homogene razporeditve znotraj materiala posledično nekoliko povečala toplotna prevodnost poliuretana. V drugem in tretjem primeru (sliki 11b in 11c) razporeditev PCM ni bila homogena, kar

je privedlo do večjega raztrosa rezultatov. Vendar tudi v primeru takšnih sendvič panelov PCM niso popolnoma izkoriščeni zaradi nizke toplotne prevodnosti poliuretana.

Fu in sodelavci (Fu, 2017) so preučevali kompozit PCM (kalcijev klorid heksahidrat – $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) in polistirena, vstavljenega v plošče iz porobetona, ki se uporabljajo kot zaključni/pohodni sloj pri ravnih strehah (slika 12). Namen tovrstnih plošč je tudi delno povečanje toplotne kapacitete konstrukcijskega sklopa (predvsem v primeru lahke nosilne konstrukcije). Kompozit so primerjali s produktom, ki vsebuje običajno polistirensko ploščo (slika 12c). Novi produkt, ki vsebuje PCM, se od običajnega razlikuje le v tem, da so ekspandirani polistiren (EPS) zamenjali s kompozitom kapsuliranega kalcijevega klorid heksahidrata in ekspandiranega polistirena ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}/\text{EPS}$). Rezultati eksperimentov so pokazali, da je produkt s PCM bolj vplival na znižanje maksimalnih temperatur v notranjosti v primerjavi z običajnim produktom. S tem se je kompozit $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}/\text{EPS}$ izkazal za dober zadrževalnik toplote in tudi toplotni izolator, poleg tega pa je omenjeni kompozit tudi negorljiv.

Primer drugačne uporabe PCM, kjer je ta uporabljen direktno v kombinaciji s



Slika 12 • Uporaba betonskih plošč na strehi (a), betonski zgornji del plošče (b), običajna betonska plošča z ekspandiranim polistirenom (c) in betonska plošča s $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}/\text{EPS}$ kompozitom (d) (povzeto po (Fu, 2017)).



Slika 13 • Testni model s strešno betonsko ploščo z luknjami, v katerih je PCM (povzeto po (Mannivannan, 2015)).

konstrukcijskim materialom (npr. beton, opeka ipd.), sta predstavila Mannivannan in Ali (Mannivannan, 2015). Na zgornjo površino betonskih strešnih plošč sta v valjaste luknje vgradila fazno spremenljivo snov (slika 13). Za slednjo sta enako kot Fu in sodelavci (Fu, 2017) uporabila kalcijev klorid heksahidrat ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). Zgornjo površino sta prekrila s steklom, ki je preprečeval vdor vode in vlage v luknje. Nato sta opravila meritve toplotnega odziva takšne konstrukcije na primeru testne celice in ugotovila, da v tem primeru PCM izboljša toplotni odziv konstrukcije, saj se je najvišja temperatura notranjega zraka v 24-urnem ciklu ob enakih zunanjih pogojih znižala za 4 °C.

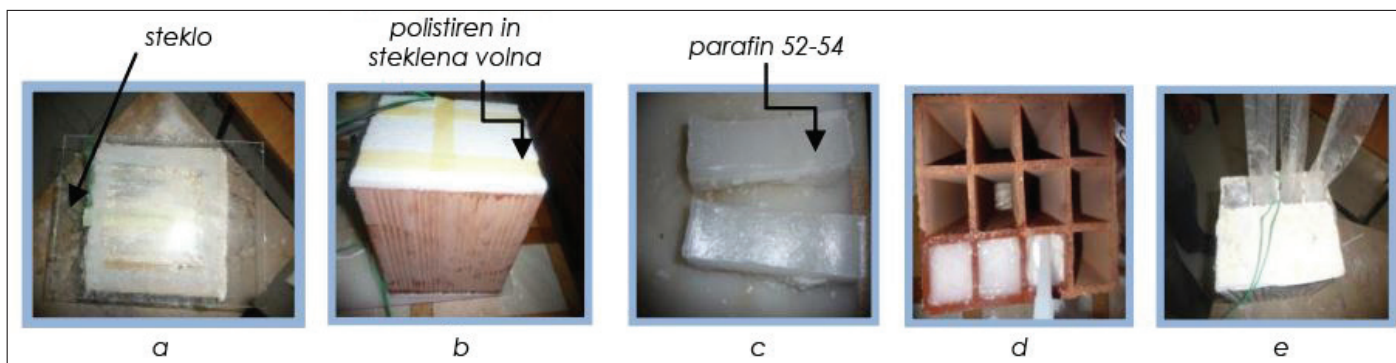
Kombinacijo uporabe PCM z opečnimi zidaki so predstavili Hichem in sodelavci (Hichem,

2013). Kot fazno spremenljivo snov so uporabili parafin 52-54, ki so ga vstavili v votline votličave opeke. Postavitev eksperimenta je predstavljena na sliki 14. Rezultati so pokazali, da lahko takšna uporaba PCM zniža površinsko temperaturo na notranji strani takšnega zidu do 3,8 °C. Pri eksperimentu so ugotovili, da bi bilo priporočljivo za nadaljnje raziskave s takšnim kompozitom uporabiti tudi opeke drugačnih geometrij. S tem bi lahko zmanjšali količino PCM, vstavljenega v votline ob hkratnem enakem učinku. Na podoben način so fazno spremenljivi material v kombinaciji z opeko uporabili Silva in sodelavci (Silva, 2012), vendar so PCM (organski parafin RT18) v opečne votline vstavili s pomočjo kovinskih kapsul (makrokapsuliranje), kot je prikazano na sliki 15. Tudi v tem primeru se je rešitev izkazala za učinkovito.

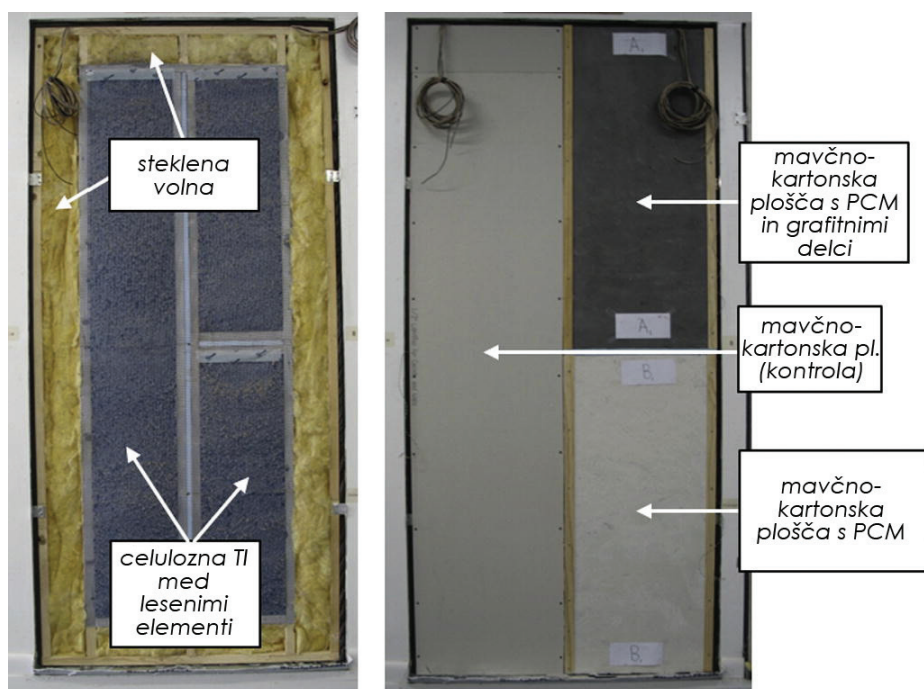


Slika 15 • Opečni zidaki z vstavljenimi makrokapsulami PCM (povzeto po (Silva, 2012)).

Eden izmed načinov uporabe fazno spremenljivih snovi v stavbah je tudi vgraditev le-teh v stenske konstrukcijske plošče za izdelavo oblog. Študijo takšnega primera so opravili Biswas in sodelavci (Biswas, 2014), kjer so PCM (kapsulirani parafin $\text{C}_{17}\text{H}_{36}$) primešali v mavčnokartonske plošče (slika 16). Pri tem so obravnavali dve različici. V prvem primeru so v mavčnokartonskih ploščah uporabili le PCM, v drugem pa so jim dodali še nanodelce ekspandiranega grafita, s čimer so zvišali toplotno prevodnost v želji po izboljšanju hitrosti prenosa toplote po plošči. V omenjenem primeru so grafitni delci v mavčnokartonske plošče dodani z namenom povečanja prenosa toplote s prevajanjem (povečanje prenosa toplote s kondukcijo). Gre za drugačen ukrep kot pri bolj znanem dodajanju grafitnih ali tudi drugih delcev (aluminijevih) v toplotne



Slika 14 • Priprava eksperimenta kombinacije votličave opeke s PCM. (a) Steklo za pomoč pri vlivanju parafina; (b) toplotnoizolacijska plast (polistiren in steklena volna); (c) parafin 52-54; (d) vlivanje parafina; (e) transparentni plastični film (povzeto po (Hichem, 2013)).



Slika 16 • Testna stena, nadgrajena z mavčnokartonskimi ploščami s PCM (povzeto po (Biswas, 2014)).

izolacije iz polistirenov (EPS in tudi XPS z refleksijskimi dodatki), kjer omenjeni dodatki zmanjšujejo prenos toplote z reflektiranjem toplotnega sevanja (zmanjševanje radiacijskega prenosa toplote). Biswas in sodelavci so nato opravili eksperimente, katerih rezultati so pokazali, da se tako nadgrajena zunanja stena najboljše obnaša pri južni orientaciji stavbe, kjer se je izkazala za dober regulator med notranjo in zunanjo temperaturo zraka (fazni zamik, dušenje).

Podobno kot Biswas in sodelavci so tudi Sharifi in sodelavci (Sharifi, 2017) preučevali upo-

rabnost PCM (kapsulirani parafin) v primeru mavčnokartonskih plošč za notranje obloge. Iz eksperimentov so se naučili, da je uporaba takšnih plošč učinkovita pri nižanju maksimalnih temperatur notranjega zraka, kar izboljša toplotno udobje v stavbah in posledično lahko vpliva na znižanje porabe energije.

Kot zanimivost omenimo, da je prof. dr. Boris Orel s Kemijskega inštituta v Ljubljani s pomočjo sodelavke Marjete Maček in slovenskega proizvajalca toplotnih izolacij že leta 1993 razvijal, predstavil na mednarodni konferenci (Orel, 1993) in tudi prijavil patentno prijavo na

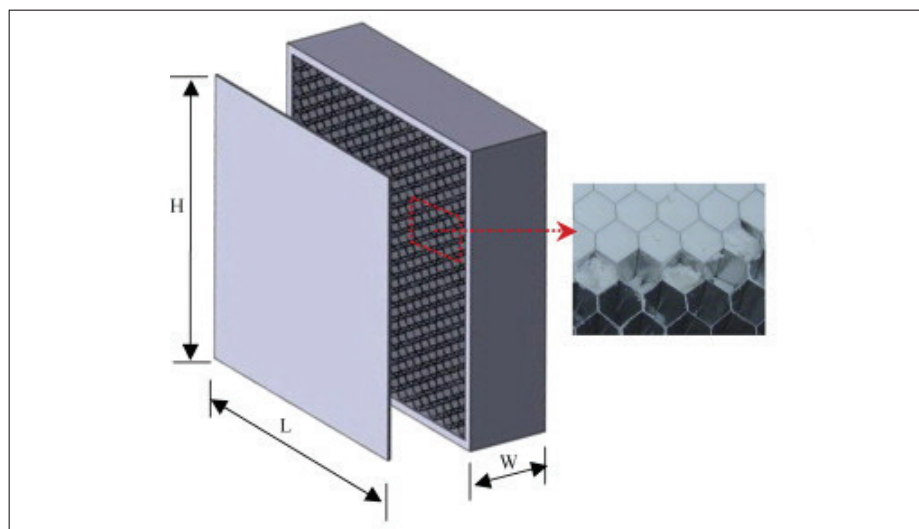
temo mavčnokartonskih plošč, ki vsebujejo PCM (maščobne kisline in parafin) ((Orel, 1993), (Maček, 1994), (Maček, 1996)). Na podoben način nekateri proizvajalci ponujajo različne komercialne proizvode, kot so mavčnokartonske plošče s kapsuliranim PCM (Rigips, 2016) in v podobni izvedbi tudi glinene plošče (Lehmore, 2012), lahko pa tudi akustične plošče (Sustainable in steel, 2017) in druge proizvode (PCM products, 2017).

Poznamo tudi način vgrajevanja PCM v zunanje stene stavb kot dodatek vpihovani (npr. celulozni) toplotni izolaciji. Ta se najpogosteje uporablja v primeru lesenih skeletnih konstrukcij, kjer prostor med elementi zapolnimo s toplotnoizolativnimi delci v razsutem stanju. V takšnem primeru lahko PCM v obliki mikroali makrokapsul primešamo celulozi ali pa ga vgradimo v prostor med linijske konstrukcijske elemente. Takšen primer vgradnje PCM so preučevali Zhang in sodelavci (Zhang, 2005) ter Evers in sodelavci (Evers, 2010), pri čemer so kot PCM uporabljali tako parafin kot hidratizirane soli. Slednje so se sicer v tem primeru izkazale slabše v primerjavi s parafinom, ki je učinkoviteje vplival na toplotni odziv takšne stene. Kljub dobri ideji za takšen način uporabe PCM sta Kenisarin in Mahkamov (Kenisarin, 2016) izpostavila manjšo uporabnost takšne rešitve, saj se PCM zaradi svoje lege globoko v toplotni izolaciji težko hitro odzove na spremembe in se ciklično ne odzove na krajše temperaturne spremembe.

Še en inovativni primer uporabe PCM sta predstavila Lai in Hokoi (Lai, 2014). Avtorja sta preučevala prototip primera, kjer sta med dve lesni plošči vstavila aluminijasto satovje, ki sta ga napolnila z mikrokapsulami fazno spremenljive snovi (parafin v polimernih kapsulah). Primer je predstavljen na sliki 17.

Po pregledu vseh možnosti in metod vgrajevanja fazno spremenljivih materialov v konstrukcijske sklope, ki so ga opravili Akeiber in sodelavci (Akeiber, 2016), so ugotovili, da je PCM v stavbah najpogosteje uporabljen na zunanjih stenah, redkeje pa na strehah in tleh.

Poleg že omenjene četrstoletne stare patentne prijave mavčnokartonskih plošč ((Maček, 1994), (Maček, 1996)) sta na Fakulteti za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo UL v tem obdobju področje fazno spremenljivih snovi na podlagi različnih vzorcev raziskovala dr. Marjana Šijanec Zavrl (Šijanec Zavrl, 1993) in mag. Miha Tomšič (Tomšič, 1994). V Sloveniji so nam znani tudi razvojni projekti z uporabo PCM za fasadne panele (Trimo, 2018) in v prometu na zrcalnih v križiščih (POS



Slika 17 • Primer v steno vstavljenega aluminijastega satovja, polnjenega s parafinskimi kapsulami (povzeto po (Lai, 2014)).

Plastika, 2018). Fazno spremenljiva snov izza zrcalne površine zmanjšuje možnosti za nastanek kondenzacije. PCM uporabljamo tudi za dušenje pregrevanja in podhlajevanja aluminijastih ogrodij prestižnega pohištva, namenjenega jahtam, hotelskim terasam in podobno (Kreal, 2018).

Povsem nov kompozitni produkt, ki vključuje PCM (parafin), so predstavili raziskovalci s Fakultete za strojništvo UL (Arkar, 2018). Produkt je sestavljen iz dveh plasti lesa, med kateri je vstavljen sloj PCM in vakuumsko-izolacijska plošča – VIP (za podrobnejšo razlago o VIP glej (Kunič, 2012)). Izdelek je namenjen predvsem uporabi v leseni gradnji in ima iz-

boljšan dinamični toplotni odziv. Dobra lastnost produkta je tudi, da ne presega debeline vrat ali okna (68 mm).

Ne nazadnje omenimo še aktivne sisteme, ki vključujejo PCM in jim nismo posvečali večje pozornosti, saj so v tem primeru PCM pretežno uporabljeni v kombinaciji s strojnimi inštalacijami. PCM lahko na takšen način uporabljamo tudi pri toplotno aktiviranih stavbnih sistemih (angleško *Thermally Activated Building Systems*, TABS). Sistem deluje nadzorovano, običajno v kombinaciji s prisiljenim prezračevanjem. Ponoči, ko v notranjost privedemo hladen zunanji zrak, PCM spremeni agregatno stanje iz kapljev-

nastega v trdno. Podnevi, ko bi se notranji zrak sicer segrel, pa se PCM tali na račun toplote, ki jo odvaja notranjemu zraku. Na ta način vzdržuje nizko temperaturo notranjega zraka. Enak učinek lahko dosežemo tudi z različnimi hladilniki. Večinoma se takšni sistemi vgradijo za namen hlajenja. Sistem je lahko vgrajen v spuščeni strop, lahko pa tudi v zunanjo steno ali centralni prezračevalni sistem. Kombinacije PCM in aktivnih sistemov so dobro raziskane, razvoj na področju pa se nadaljuje ((Stritih, 2011), (Weinläder, 2014), (Stritih, 2017)). Vplive takšne uporabe PCM na notranje okolje in energijo za delovanje stavbe pa sta predstavila Korjenić in Dreyer (Korjenić, 2009).

5 • SKLEP

Uporaba fazno spremenljivih snovi je v porastu. Zlasti to velja za gradbeno industrijo, saj lahko z njihovo uporabo v konstrukcijskih sklopih, ki imajo nizko toplotno kapaciteto, dosežemo večje toplotno udobje v notranjem okolju, pri tem pa prihranimo energijo (predvsem pri hlajenju) (Pajek, 2017). Fazno spremenljive snovi omogočajo širok spekter uporabe. Pregled literature je pokazal, da jih lahko vgradimo tako v material za nosilno konstrukcijo kot tudi v zaščitne sloje (npr.

toplotno izolacijo ali najbolje v finalne plasti). Pri tem poznamo več različnih vrst fazno spremenljivih snovi, najpogostejše uporabljani pa so predvsem parafini in hidratizirane soli (predvsem $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). Fazno spremenljive snovi imajo največji učinek, če jih vgradimo v sloj konstrukcije, ki je čim bližje notranjosti, saj imajo tako lahko hiter odzivni čas, ki je kos dnevnim spremembam temperature. Pomembno pa je tudi, da jih ne obdamo z materiali nizke toplotne prevodnosti, pri čemer

ugotavljamo, da rešitve v kombinaciji s toplotnimi izolatorji, kot sta na primer poliuretan ali polistiren, nižajo učinkovito ciklično aktivacijo PCM. Fazno spremenljive snovi bodo učinkovito uporabljene le v primerih, ko se bo ob temperaturnih nihanjih, najbolje kar vsakodnevnih, spremenila faza PCM po celotni debelini, ne samo na površini. Na področju uporabe fazno spremenljivih snovi v gradbeništvu obstaja še veliko prostora za iskanje novih tehnoloških rešitev. Relativno slabo je raziskana povezava med obnašanjem PCM in toplotnimi karakteristikami materiala, v katerega PCM vgrajujemo.

6 • LITERATURA

- Akeiber, H., Nejat, P., Majid, M. Z. A., Wahid, M. A., Jomehzadeh, F., Zeynali Famileh, I., Calautit, J. K., Hughes, B. R., Zaki, S. A., A review on phase change material (PCM) for sustainable passive cooling in building envelopes, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 60, 1470–1497, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.036>, 2016.
- Anisur, M. R., Mahfuz, M. H., Kibria, M. A., Saidur, R., Metselaar, I. H. S. C., Mahlia, T. M. I., Curbing global warming with phase change materials for energy storage, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 18, 23–30, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.014>, 2013.
- Arkar, C., Domjan, S., Medved, S., Lightweight composite timber façade wall with improved thermal response, *Sustain. Cities Soc.* 38, 325–332, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.01.011>, 2018.
- Ascione, F., Bianco, N., De Masi, R. F., de' Rossi, F., Vanoli, G. P., Energy refurbishment of existing buildings through the use of phase change materials: Energy savings and indoor comfort in the cooling season, *Appl. Energy* 113, 990–1007, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.045>, 2014.
- Aydin, A. A., Okutan, H., Polyurethane rigid foam composites incorporated with fatty acid ester-based phase change material. *Energy Convers. Manag.* 68, 74–81, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.12.015>, 2013.
- Biswas, K., Lu, J., Soroushian, P., Shrestha, S., Combined experimental and numerical evaluation of a prototype nano-PCM enhanced wallboard. *Appl. Energy* 131, 517–529, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.02.047>, 2014.
- Castellón, C., Medrano, M., Roca, J., Cabeza, L. F., Navarro, M. E., Fernández, A. I., Lázaro, A., Zalba, B., Effect of microencapsulated phase change material in sandwich panels, *Renew. Energy* 35, 2370–2374. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.03.030>, 2010.

- Desai, D., Miller, M., Lynch, J. P., Li, V. C., Development of thermally adaptive Engineered Cementitious Composite for passive heat storage, *Constr. Build. Mater., Concrete Sustainability* 67, 366–372, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.104>, 2014.
- Duol, Dušan Olaj, Gremo delat posel v vesolje! *Dnevnik*, <https://www.dnevnik.si/1042757165>, 2016.
- Evers, A. C., Medina, M. A., Fang, Y., Evaluation of the thermal performance of frame walls enhanced with paraffin and hydrated salt phase change materials using a dynamic wall simulator, *Build. Environ.* 45, 1762–1768, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.02.002>, 2010.
- Fallahi, A., Guldentops, G., Tao, M., Granados-Focil, S., Van Dessel, S., Review on solid-solid phase change materials for thermal energy storage: Molecular structure and thermal properties, *Appl. Therm. Eng.* 127, 1427–1441, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.08.161>, 2017.
- Frysinger, G. A., Sliwowski, J., Phase change material storage assisted heating system, PH-87-5, University of Delaware, USA, 1987.
- Fu, L., Wang, Q., Ye, R., Fang, X., Zhang, Z., A calcium chloride hexahydrate/expanded perlite composite with good heat storage and insulation properties for building energy conservation, *Renew. Energy* 114, 733–743, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.07.091>, 2017.
- Hichem, N., Noureddine, S., Nadia, S., Djamil, D., Experimental and Numerical Study of a Usual Brick Filled with PCM to Improve the Thermal Inertia of Buildings, *Energy Procedia, TerraGreen 13 International Conference 2013 - Advancements in Renewable Energy and Clean Environment* 36, 766–775, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.07.089>, 2013.
- Kenisarin, M., Mahkamov, K., Passive thermal control in residential buildings using phase change materials, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 55, 371–398, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.128>, 2016.
- Kocjančič, U., Fazno spremenljiv material v visokoizolativnem tankoslojnim stavbnem ovoju, diplomska naloga, Univerza v Ljubljani, Ljubljana, 2011.
- Korjenic, A., Dreyer, J., Možnosti za zmanjšanje potrebe po ogrevalni energiji s povečanjem toplotne kapacitete stavbe. *Gradb. Vestn.* 58, 213–216, 2009.
- Košny, J., PCM-enhanced building components: an application of phase change materials in building envelopes and internal structures, *Engineering materials and processes*, Springer, Cham, 2015.
- Kreal, <http://www.kreal.si/si/podjetje>, 2018.
- Kunič, R., predavanja pri predmetu Napredni materiali, UL FGG, 2017.
- Kunič, R., Vacuum Insulation Panels - An Assessment of the Impact of Accelerated Ageing on Service Life, *Stroj. Vestn. – J. Mech. Eng.* 58, 598–606, <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2012.539>, 2012.
- Kuznik, F., David, D., Johannes, K., Roux, J.-J., A review on phase change materials integrated in building walls. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 15, 379–391, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.08.019>, 2011.
- Lai, C., Hokoi, S., Thermal performance of an aluminum honeycomb wallboard incorporating microencapsulated PCM, *Energy Build.* 73, 37–47, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.01.017>, 2014.
- Lehmore, 2012. Modern, green and individual - The ecological alternative in dry construction, URL www.lehmore.de/home_de.php, 2012.
- Maček, M., Orel, B., Kompozitni material za skladiščenje toplote, postopek za njegovo pripravo in njegova uporaba, patent SI 9300257 (A), 1994.
- Maček, M., Orel, B., Srčič, S., Dolinar, J., Crnjak Orel, Z., Kompozit za skladiščenje toplote in postopek za njegovo izdelavo, patent SI 9500025 (A), 1996.
- Mannivannan, A., Ali, M. T. J., Simulation and experimental study of thermal performance of a building roof with a phase change material (PCM), *Sadhana* 40, 2381–2388, <https://doi.org/10.1007/s12046-014-0332-8>, 2015.
- NASA Langley Research Center, A New Home on Mars: NASA Langley's Icy Concept for Living on the Red Planet, URL <https://www.nasa.gov/feature/langley/a-new-home-on-mars-nasa-langley-s-icy-concept-for-living-on-the-red-planet>, 2017.
- Orel, B., Maček, M., Krainer, A., Advanced phase change (PCM) materials for heat storage applications in buildings, The 3rd European conference on architecture, Commission of the European Communities, Florence, Italy, pp. 111–114, 1993.
- Pajek, L., Hudobivnik, B., Kunič, R., Košir, M., 2017. Improving thermal response of lightweight timber building envelopes during cooling season in three European locations, *J. Clean. Prod.* 156, 939–952, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.098>, 2017.
- PCM products, <http://www.pcmproducts.net/>, 2017.
- Peternelj, J., Jagličič, Z., Osnove gradbene fizike. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana, 2014.
- POS Plastika, <https://www.pos-plastika.si/prometno-ogledalo-polikarbonat/>, 2018.
- Qian, T., Li, J., Min, X., Deng, Y., Guan, W., Ning, L., Diatomite: A promising natural candidate as carrier material for low, middle and high temperature phase change material, *Energy Convers. Manag.* 98, 34–45, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.03.071>, 2015.
- Rathod, M. K., Banerjee, J., Thermal stability of phase change materials used in latent heat energy storage systems: A review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 18, 246–258, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.022>, 2013.

Rigips, Alba balance, Efficient room temperature management with innovative PCM solid plasterboards, ch.rigips.de/download/rigips_alba_balance_infobro_de_low.pdf, 2016.

Sharifi, N. P., Shaikh, A. A. N., Sakulich, A. R., Application of phase change materials in gypsum boards to meet building energy conservation goals, *Energy Build.* 138, 455–467, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.046>, 2017.

Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., Buddhi, D., Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 13, 318–345, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.10.005>, 2009.

Šijanec Zavrl, M., Uporaba fazno spremenljivih materialov v elementih zgradbe in njihov vpliv na toplotno ugodje v pasivnih solarnih zgradbah, doktorska disertacija, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana, 1993.

Silva, T., Vicente, R., Soares, N., Ferreira, V., Experimental testing and numerical modelling of masonry wall solution with PCM incorporation: A passive construction solution, *Energy Build.* 49, 235–245, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.02.010>, 2012.

Stritih, U., Butala, V., Energy Savings in Building with a PCM Free Cooling System, *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering* 57, 2, 125–134 <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2010.066>, 2011.

Stritih, U., Charvat, P., Koželj, R., Klimes, L., Osterman, E., Ostry, M., Butala, V., PCM Thermal Energy Storage in Solar Heating of Ventilation Air—Experimental and Numerical Investigations, *Sustain. Cities Soc.*, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.10.018>, 2017.

Sustainable in steel, PCM Products, http://www.sustainableinsteel.eu/p/556/pcm_products.html, 2017.

Thambidurai, M., Panchabikesan, K., N. K. M., Ramalingam, V., Review on phase change material based free cooling of buildings—The way toward sustainability, *J. Energy Storage* 4, 74–88, <https://doi.org/10.1016/j.est.2015.09.003>, 2015.

Tomšič, M., Primerjalna analiza toplotnega odziva fazno spremenljivih materialov, magistrska naloga, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana, 1994.

Trimo, Qubiss in drugi fasadni sistemi, <https://trimo-group.com/si/trimo/proizvodi/fasade-in-stene/>, 2018.

Weinläder, H., Körner, W., Strieder, B., A ventilated cooling ceiling with integrated latent heat storage—Monitoring results, *Energy Build.* 82, 65–72, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.013>, 2014.

Yang, C., Fischer, L., Maranda, S., Worlitschek, J., Rigid polyurethane foams incorporated with phase change materials: A state-of-the-art review and future research pathways, *Energy Build.* 87, 25–36, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.075>, 2015.

Ye, H., Long, L., Zhang, H., Zou, R., The performance evaluation of shape-stabilized phase change materials in building applications using energy saving index, *Appl. Energy* 113, 1118–1126, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.067>, 2014.

Zhang, M., Medina, M. A., King, J. B., Development of a thermally enhanced frame wall with phase-change materials for on-peak air conditioning demand reduction and energy savings in residential buildings, *Int. J. Energy Res.* 29, 795–809, <https://doi.org/10.1002/er.1082>, 2005.

Zhou, D., Shire, G. S. F., Tian, Y., Parametric analysis of influencing factors in Phase Change Material Wallboard (PCMW), *Appl. Energy* 119, 33–42, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.12.059>, 2014.

USPOSABLJANJE ZA OPERATERJE ČISTILNIH NAPRAV

**Strokovna delavnica s prof. Henrijem Spanjersom,
12. - 13. april 2018**

V JP CČN Domžale – Kamnik organizirajo zanimivo dvodnevno interaktivno strokovno delavnico o vodenju procesov čiščenja odpadne vode na čistilnih napravah, ki jo bo vodil vrhunski strokovnjak iz Nizozemske, prof. Henri Spanjers. Udeleženci se bodo seznanili z nekaterimi temeljnimi koncepti pri čiščenju odpadne vode z uporabo simulatorjev čistilnih naprav BioWin, ki delujejo podobno kot simulatorji letenja. Namen praktičnega in teoretičnega usposabljanja inženirjev in upravljavcev čistilnih naprav je doseganje optimizacije in izboljšanje rezultatov čiščenja odpadnih voda, kar vključuje zmanjševanje stroškov investicijskega vzdrževanja in obratovanja, doseganje procesnih ciljev ter stabilno in ustrezno obratovanje čistilne naprave ob doseganju zahtevanega učinka čiščenja.

Izobraževanje bo potekalo v angleškem jeziku. Več informacij je na voljo na www.ccn-domzale.si.

dr. Marjeta Stražar, JP CČN Domžale-Kamnik d. o. o.