

FAZNO PROMJENLJIVI MATERIJALI

PHASE-CHANGE MATERIALS

Željko Kos

Stručni članak

Sažetak: Današnja praksa održive gradnje zahtjeva brzo i racionalno građenje energetski učinkovitih građevina. Prilikom građenja teži se dematerijalizaciji građevinskih elemenata, što dovodi do umanjenja toplinske akumulacije građevine i posredno do povećanog utroška energenata za grijanje, hlađenje i klimatizaciju. Toplinski kapacitet građevine, naročito kod laganih konstrukcija s izražajnijim problemom, sve češće rješava se uporabom fazno promjenljivih materijala, takozvanih PCM (Phase Change Materials), koji imaju mogućnost pohrane znatno veće topline od konvencionalnih građevinskih materijala. To im omogućuje svojstvo da prelaze iz jednog u drugo agregatno stanje u temperaturom intervalu od 20 do 30 °C, te da pritom pohranjuju ili oslobađaju velike količine latentne topline iskoristive za sobnu regulaciju temperature. Na temperaturama nižim i višim od temperature tališta ponašaju se kao ostali građevinski materijali, ali im je specifični toplinski kapacitet obično znatno veći, te i senzibilnom toplinskom energijom doprinose boljim toplinskim karakteristikama građevine u uporabi.

Ključne riječi: fazno promjenljivi, latentna, senzibilna, talište, toplinski kapacitet

Professional paper

Abstract: Today's practice of sustainable construction requires quick and rational construction of energy efficient buildings. The tendency during construction is to dematerialise construction elements, which leads to the reduction of heat accumulation of building and indirectly to the increased consumption of energy for heating, cooling and air conditioning. The problem of heat capacity, especially notable in lightweight structures, is increasingly solved using phase-change materials (PCM), which have much greater ability to store heat than conventional building materials. This feature allows them to pass from one to another physical condition in the temperature interval of 20-30°C, and at the same time to store or release large amounts of latent heat usable for room temperature control. At temperatures lower and higher than the temperature of the melting point they behave like other construction materials; however, their specific heat capacity is usually much higher, and with sensible heat, they contribute to better thermal performance of buildings in use.

Key words: phase-change, latent, sensible, melting point, heat capacity

1. UVOD

Moderna gradnja velikim dijelom zahtjeva montažni i polumontažni način građenja, većinom skeletnih konstrukcija ispunjenih i obloženih laganim građevinskim materijalima s vrlo visokim toplinsko-izolacijskim svojstvima. Teži se višem stupnju prefabriciranja svih građevinskih elemenata što omogućava bržu izgradnju, te time visoku razinu učinkovitosti.

Međutim, u nastojanju dematerijalizacije građevinskih elemenata, pored raznih praktičnih i ekonomskih prednosti, dolazi do problema gubitka mase građevine potrebne za toplinsku akumulaciju, što rezultira negativnim utjecajima na unutarnju klimu i povećanom potrošnjom energenta za grijanje, hlađenje i klimatizaciju. Vrlo lako se zaključuje da bi bilo poželjno nadomjestiti mogućnost izotermne pohrane dnevnih vršnih toplinskih opterećenja ljeti, a zimi omogućiti toplinsku akumulaciju konstrukcije radi manjeg

kontinuiranog opterećenja sustava grijanja i klimatizacije, te radi održavanja topline grijanog prostora za vrijeme prekida grijanja.

Današnji propisi problem toplinskih karakteristika laganih konstrukcija u smislu energetske učinkovitosti rješavaju na način povećanja toplinskog otpora površina konstrukcije koje sudjeluju u transmisivnim gubicima topline za grijanje i hlađenje [1]. Potrebno povećanje toplinskog otpora u većini slučajeva rezultira jedino povećanjem debljine termo-izolacijskog sloja, što u naravi doprinosi dodatnom rasterećenju sustava grijanja, hlađenja i klimatizacije, naročito u slučaju upotrebe rekuperatora zraka u sustavu klimatizacije ili samo kod ventilacije zraka, ali problem nedostatka toplinske akumulacije laganih konstrukcija ostaje neriješen.

Problem se danas počinje rješavati primjenom specijalnih takozvanih PCM materijala (engl. Phase Change Materials) ugrađenih u građevinske elemente ili integriranih s drugim građevinskim materijalima. PCM imaju sposobnost promjene agregatnog stanja i pohrane,

te zatim kod povratka u prvobitno agregatno stanje oslobađaju velike količine energije u vidu latentne topline, uz istovremenu minimalnu promjenu vlastite temperature.

Svakako da je efektu primjene PCM-a s aspekta efikasnog doprinosa održivom razvoju potrebno dati nedvojbenu prednost u odnosu na manje izražajnu ekonomsku profitabilnost zbog još uvijek relativno visoke tržišne cijene.

Ovim člankom želi se doprinijeti popularizaciji i većoj primjeni PCM-a u građevinarstvu, čime bi se zasigurno ubrzao daljnji ionako neminovan tehnološki razvoj PCM-a, a što bi rezultiralo kvalitetnijim korištenjem prostora i ekonomski povoljnijim u energetske smislu. Također, člankom se želi skrenuti pozornost na nužnost primjene građevinskih materijala s kojima se može doprinijeti zaštiti okoliša, te iako se time prema sadašnjem odnosu cijena na tržištu povećavaju troškovi građenja, s aspekta održivog razvoja uz pravilnu primjenu materijala to je sigurno isplativa investicija.

2. FAZNO PROMJENLJIVI MATERIJALI

Fazno promjenljivi materijali, takozvani PCM su tvari ili smjese tvari koje isparavanjem, taljenjem ili kristalizacijom, odnosno kondenzacijom, skrutnjavanjem ili rekristalizacijom primaju, odnosno oslobađaju velike količine energije u vidu latentne topline, uz istovremenu minimalnu promjenu vlastite temperature, a temperatura promjene agregatnog stanja nalazi im se u iskoristivom području za regulaciju unutarnjih projektnih temperatura.

2.1. Latentna toplina i princip djelovanja PCM

Kod klasičnih građevinskih materijala mogućnost pohrane osjetne (senzibilne) toplinske energije ovisi o masi i specifičnom toplinskom kapacitetu materijala, te o razlici temperature u odnosu na okolinu. Specifični toplinski kapacitet čvrstih tijela, u koja se u uglavnom ubraja građevinski materijal, ispituje se pri konstantnom volumenu (samo uvjetno) i tlaku, izražava se po jedinici mase, a definiran je kao i specifična toplina, potrebnom količinom topline da se jediničnoj masi (1 kg) nekog materijala poveća stupanj temperature za temperaturnu jedinicu (1 K). Pri ispitivanju specifičnog toplinskog kapaciteta postoji ovisnost i o temperaturi ispitivanja, pa tako, primjerice različite temperature ispitivanja kod vode rezultiraju različitim vrijednostima specifičnog toplinskog kapaciteta:

- 100 °C (para) $C_p = 2,08 \text{ kJ/(kg K)}$
- 25 °C (tekućina) $C_p = 4,18 \text{ kJ/(kg K)}$
- -10 °C (led) $C_p = 2,05 \text{ kJ/(kg K)}$

Kod zgrada s masivnim građevnim dijelovima, zahvaljujući većem toplinskom kapacitetu u odnosu na lagane konstrukcije, prilikom prekida, odnosno smanjenja grijanja dolazi do vraćanja akumulirane temperature iz konstrukcije u grijani prostor, što osigurava stabilnu temperaturu.

Navedeni pozitivan učinak izostaje kod laganih konstrukcija, a budući da su toplinski kapaciteti i kod

masivnih građevnih dijelova današnje gradnje relativno mali, te razlike temperature i mase materijala ograničene, također je poželjno da ukupni efekt pohrane topline bude znatno veći.

Primjerice, izračuna li se pohranjivanje osjetne toplinske energije čelika, betona, ekspaniranog polistirena i vode, za masu materijala od 10 kg pri zagrijavanju sa 15°C na 25°C, različitost rezultata pokazuje ovisnost o vrijednostima specifičnih toplinskih kapaciteta materijala koje iznose: 460 J/(kg K) za čelik gustoće 7800 kg/m³, 1000 J/(kg K) za beton gustoće 2500 kg/m³, 1450 J/(kg K) za ekspanirani polistiren gustoće 15-30 kg/m³ i 4180 J/(kg K) za vodu gustoće 998 kg/m³.

Pohranjena osjetna toplina (Q_s) računa se kao umnožak specifičnog toplinskog kapaciteta ($C_{p,v}$), mase (m) i razlike temperatura temperaturnog intervala zagrijavanja materijala (ΔT), te za navedeni primjer iznosi:

$$Q_s = C_{p,v} \cdot m \cdot \Delta T \text{ [kJ]}$$

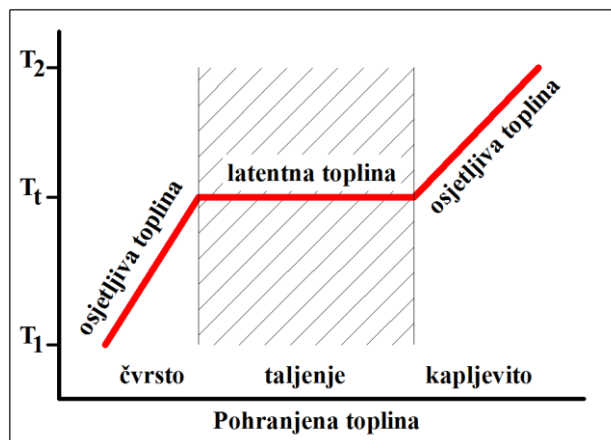
- čelik 46 kJ
- beton 100 kJ
- ekspanirani polistiren 145 kJ
- voda 418 kJ

Mogućnost znatno većeg efekta pohrane topline moguće je postići primjenom PCM-a, koji dodatno omogućuju pohranu latentne topline, a specifični toplinski kapacitet materijala im je znatno veći. Kod PCM-a čiste kristalne tvari zagrijavanjem prelaze pri svojestvenoj, točno definiranoj temperaturi tališta u kapljevitost. Pri tome dolazi do značajne pohrane raspoložive količine energije iz okoliša, ali istovremeno ne dolazi do povišenja temperature PCM-a, već samo do promjene agregatnog stanja.

Tako akumulirana toplina naziva se latentnom toplinom (Q_l), a računa se kao umnožak specifične topline taljenja (q_s) i mase (m) pojedinog PCM-a:

$$Q_l = q_s \cdot m \text{ (kJ)}$$

Princip djelovanja PCM-a prikazan je općim oblikom radnog dijagrama (slika 1).



Slika 1. Ovisnost količine pohranjene toplinske energije PCM-a o temperaturi

Zaključuje se da je vrijednost ukupno pohranjene topline kod konvencionalnih materijala jednaka pohranjenoj osjetnoj toplini, a kod PCM-a jednaka je

zbroju pohranjene osjetne i latentne topline, uz uvjet da se temperatura tališta PCM-a nalazi u promatranom vremenskom intervalu.

Za usporedbu s navedenim primjerom pohrane osjetne topline kod konvencionalnih materijala, izračunata je ukupno pohranjena toplina kod PCM-a parafina također mase 10 kg u jednakom temperaturnom intervalu od 10 °C kao u ranijem primjeru, a u kojem se nalazi i talište parafina. Vrijednost specifične topline taljenja promatranog parafina iznosi 173,4 kJ/kg, a specifični toplinski kapacitet čvrste faze jednak je 2,89 kJ/(kg K). Specifični toplinski kapacitet kapljevito stanja parafina je veći u odnosu na čvrstu fazu, ali ga u ovom slučaju nije potrebno uzimati u obzir, jer se temperatura taljenja nalazi na gornjoj granici u promatranom temperaturnom intervalu zagrijavanja parafina. Ukupna pohranjena toplina iznosi:

$$Q_s + Q_l = 289 + 1734 = 2023 \text{ kJ}$$

Dobiveni rezultat za jednake temperaturne uvjete pokazuje dvadesetak puta veći toplinski kapacitet jednake mase PCM parafina u odnosu na beton gustoće 2500 kg/m³, koji se ubraja u vrlo dobre konvencionalne toplinske akumulatore.

Kako je u praksi vrlo teško PCM ugraditi kao samostalan građevinski materijal, za usporedbu se navodi primjer ploče debljine 15 mm u koju je po m² ugrađeno svega 3 kg PCM-a u obliku posebne mješavine voska, te takve dvije ploče u smislu toplinskog kapaciteta nadomješćuju betonski zid debljine 14 cm ili zid debljine 36,5 cm od visoko perforirane blok opeke [2].

Pri hlađenju PCM kristalizacijom pri istoj temperaturi prelaze iz kapljevito u čvrsto agregatno stanje otpuštajući latentnu toplinu u okoliš, a pri temperaturama nižim i višim od tališta, odnosno temperature skrtnjavanja PCM se ponašaju kao svaki drugi konvencionalni građevinski materijal.

2.2. Vrste i svojstva PCM

Poznate kemijske spojeve s mogućnošću pohranjivanja, odnosno oslobađanja znatne količine latentne topline bilo je potrebno integrirati kao dodatak konvencionalnim građevinskim materijalima da bi se proizveli PCM, koji mijenjaju fazu u kraćim vremenskim temperaturnim intervalima unutar realnih promjena temperatura vanjskog zraka.

Prikladnost proizvodnje u formi granula ili vodenih disperzija otkrivena je kod organskih i anorganskih spojeva [3]:

- hidrati anorganskih soli, posebno kalcij klorid heksahidrat i hidrat natrijevog sulfata tzv. glauberova sol
- organski PCM od kojih su najpoznatiji parafini i mješavine alkana (zasićeni ugljikovodici)
- alkoholi, prvenstveno polietar poliol, masne kiseline i esteri masnih kiselina
- eutektičke smjese različitih materijala

Mikro granule PCM-a promjera 5-20 μm, zbog promjene do 10 posto volumena prilikom fazne transformacije, moraju biti obavijene nekom rastezljivom ovojnicom da

ne dođe do sušenja ili curenja materijala. Za ovojnicu mikro granula se najčešće koristi polietilen, polipropilen i poliakrilat.

Granule PCM-a mogu se dodavati, odnosno umiješavati u mineralne žbuke, gipsanu masu za izradu ploča, porobetone i druge građevinske materijale, a PCM se koriste i na specijalnim umreženim nosačima.

Najbitnija svojstva PCM-a su da imaju što veći ukupni toplinski kapacitet i da se promjena faze, odnosno talište nalazi u temperaturnom intervalu iskoristivom za regulaciju sobnih temperatura od 20 do 30 °C. Da bi bili učinkovitiji važno je da im je toplinska vodljivost što veća, odnosno da su loši toplinski izolatori, te da učinkovitim zračenjem otpuštaju toplinu u okoliš. Svakako da je kod većine PCM-a vrlo bitno da uopće postoji mogućnost miješanja s ostalim građevinskim materijalima, kao i kompatibilnost kontakta s integriranim konvencionalnim komponentama, naročito u smislu sprječavanja korozije. Pored potrebne mehaničke čvrstoće s obzirom na uporabu, potrebna je kemijska stabilnost i stabilitet faza PCM-a, te negorivost i otpornost na povišene temperature.

Od PCM-a se, kao i od svih ostalih građevinskih materijala, zahtjeva neškodljivost za zdravlje ljudi i okoliš.

2.3. Primjena PCM i primjeri iz prakse

Početak primjene PCM-a u građevinarstvu datira od pedesetih godina prošlog stoljeća, kada su u SAD-u na pročelja zgrada montirani paneli ispunjeni PCM-om. Da bi se spriječilo odavanje topline u okoliš paneli su prekrivani staklom, te su tijekom dana upijali sunčevu toplinu, a noću su latentnom toplinom zagrijavali zid. NASA-ina istraživački centri su prilikom izrade svemirskih odijela značajno doprinijeli razvoju PCM-a, a transferom tehnologije došlo je do primjene PCM-a u proizvodnji odjeće i sportske opreme, i to materijala s temperaturom taljenja u temperaturnom području ugodnom za ljudski organizam od 18 do 27 °C. PCM s nižim talištem koriste se pri transportu dobara osjetljivih na povišenu temperaturu, a za građevinarstvo su značajni i oni s višim talištem. Koriste se kao izmjenjivački fluidi u solarnim kolektorima, u sustavima podnog centralnog grijanja te za zaštitu elektroničke opreme i telekomunikacijskih postrojenja.

Kod primjera primjene PCM-a kao ispune transparentnih panela na pročeljima Građevinske akademije u Berlinu, a radilo se o hidratima soli, ispitivani su transmisijski gubici topline i uspoređivani s gubicima kroz betonske panele s istim koeficijentom prolaska topline. Ispitivanje je rezultiralo 23 posto manjim transmisijским gubicima topline kod panela ispunjenih hidratima soli. Istodobno su razlike plošnih temperatura zida na unutarnjoj strani kod PCM-a bile znatno manje, što je uvjetovalo ujednačeniju, odnosno višu temperaturu zraka u prostoriji [4].

Učinkovita primjena PCM-a, primjerice transparentnih panela PCM-a i sličnih tehničkih rješenja na osunčanim dijelovima zgrade može se svrstati u dobivanje energije iz obnovljivih izvora, ali isto tako može doći do nepotrebne i neadekvatne primjene PCM-a.

Za primjer nepotrebne primjene PCM-a navodi se pokušaj kod stare masivne zgrade da se samo uporabom mase za gletanje s dodacima mikro granula parafina utječe na poboljšanje toplinskih karakteristika.

Zbog velike pohrane osjetne topline postojećih masivnih zidova učinak PCM-a, s aspekta unutarnje plošne temperature zidova i temperature prostorija, bio je zanemariv.

Primjer neadekvatne primjene PCM-a prepoznaje se kod ispitivanja primjene PCM a u Fraunhofer institutu za solarne energetske sisteme (ISE) u Freiburgu, SRNJ. Za ispitivanje odabrane su tri uredske prostorije jednakih položajnih pogodnosti u energetske smislu, odnosno iste osunčanosti i južne orijentacije. U prvoj su zidovi ožbukani gipsanom žbukom debljine 15 mm s direktno umiješanih 10 masenih postotaka granula na bazi parafina. U drugoj su zidovi oslojeni s masom za gletanje debljine 6 mm s 25 masenih postotaka mikro kapsuliranog parafina, a u trećoj prostoriji nije bilo ugrađenog PCM-a, te je služila kao referentna. Kod vanjskih temperatura od 24 do 26 °C usporedbom s referentnom prostorijom ustanovljeno je samo neznatno sporije zagrijavanje zidova. Razlog je bio u masivnoj, stropnoj AB ploči, koja nije bila obrađena PCM-om, te je njezin veliki osjetni toplinski kapacitet ujednačavao učinak latentnog kapaciteta zidova [4].

3. ZAKLJUČAK

Odgovarajući toplinski kapacitet građevine je od velike važnosti, kako za masivne građevine, tako i naročito za današnju praksu održive gradnje, velikim dijelom brzog i učinkovitog građenja laganih konstrukcija.

Znatno povećanje toplinskog kapaciteta omogućuje primjena fazno promjenljivih materijala, takozvanih PCM, koji imaju dodatnu sposobnost da kod promjene faze do koje dolazi u temperaturnom intervalu od 20 do 30 °C pohrane veliku količinu latentne topline iskoristive za regulaciju sobnih temperatura.

Iz ranije navedenih primjera proizlazi da kod masivnih konstrukcija može vrlo lako doći do neadekvatne ili nepotrebne primjene PCM-a. Zaključuje se da je potrebno voditi računa o usklađenosti svih unutarnjih obloga i konstruktivnih elemenata, odnosno njihovih ukupnih toplinskih kapaciteta, a dobro toplinski izolirane građevine s velikim osjetnim toplinskim kapacitetom vanjske ovojnice, te posljedično ujednačenom unutarnjom temperaturom, nije potrebno obrađivati PCM-om.

Kod laganih konstrukcija uporaba PCM-a za energetske rješenje povećanja ukupnog toplinskog kapaciteta građevine, s velikom sigurnošću može se bezrezervno preporučiti. Također je potrebno imati u vidu pozitivan efekt primjene PCM-a s aspekta efikasnog doprinosa održivom razvoju. Međutim, s prijedlogom obvezne primjene PCM-a kod laganih konstrukcija potrebno je biti vrlo oprezan, jer još uvijek relativno visoka cijena PCM-a mogla bi rezultirati većom primjenom konvencionalnih masivnih građevinskih materijala.

4. LITERATURA

- [1] Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama, Narodne novine 110/2008, 89/2009
- [2] http://www.micronal.de/portal/load/ffd443845/BASF_Micronal_PCM_Broschuere%202009_deutsch.pdf (Dostupno:10.03.2013.)
- [3] http://www.fkit.unizg.hr/_news/31881/Stanislav_Kurajica.pdf (Dostupno:10.03.2013.)
- [4] <http://www.pdfio.com/k-3051634.html> (Dostupno:10.03.2013.)
- [5] <http://www.ise.fraunhofer.de/de/geschaeftsfelder-und-marktbereiche/energieeffiziente-gebaeude-und-gebaeudetechnik/waerme-und-kaeltespeicher10pt> (Dostupno:10.03.2013.)
- [6] http://www.pcmproducts.net/files/pcm_products_catalogue.pdf (Dostupno:10.03.2013.)

Kontakt autora:

**Željko Kos, struč.spec.ing.grad.,
vanjski suradnik**
Veleučilište u Varaždinu
J. Križanića 33, 42000 Varaždin
mob: 098/757-989
e-mail: kos.vz@live.com