

Damjana Celcar

Laboratorij za produktno oblikovanje in tekstilne materiale, Visoka šola za dizajn v Ljubljani,
Samostojni visokošolski zavod, Pridružena članica Univerze na Primorskem

Inteligentne tekstilije s fazno spremenljivimi materiali in njihov vpliv na toplotno udobje oblačil

Influence of Intelligent Textiles with Phase-Change Materials on Thermal Comfort of Clothing

Pregledni znanstveni članek/Scientific Review

Poslano januar 2012 • Sprejeto februar 2012

Izvleček

V prispevku so predstavljene inteligentne tekstilije s fazno spremenljivimi materiali (PCMs), ki z dinamičnim shranjevanjem in sproščanjem latentne toplote v temperaturnem območju blizu temperature kože – medtem ko so izpostavljene faznemu prehodu iz trdnega v tekoče ali iz tekočega v trdno agregatno stanje – omogočajo uravnavanje telesne temperature ter s tem zagotavljajo ustrezno toplotno fiziološko udobje pri nošenju oblačil. Predstavljeno je tudi stanje raziskav pri proučevanju učinka vgrajenih fazno spremenljivih materialov v oblačilih na toplotno udobje uporabnikov oblačil. Na podlagi ugotovitev iz raziskav lahko sklepamo, da tekstilije z vgrajenimi PCMs vplivajo na toplotno udobje pri nošenju oblačil, vendar so ti vplivi zaznani le kot kratkotrajni toplotni učinki. To pomeni, da ob spremembi temperature okolice ali telesne aktivnosti oblačila s PCMs le kratkotrajno pripomorejo k uravnavanju telesne temperature ter s tem k zagotavljanju toplotnega udobja pri nošenju oblačil.

Ključne besede: fazno spremenljivi materiali (PCMs), inteligentne tekstilije, toplotno udobje, oblačila

Abstract

The paper presents intelligent textiles with phase-change materials (PCMs), also called latent heat storage materials. PCMs are materials that can absorb, store and release thermal energy as latent heat, while they go through a solid-liquid transition. They were developed to regulate the human body temperature fluctuations, assuring the thermal physiological comfort of the wearer. The paper offers a basic overview of phase-change materials, with the state of research in the field of studying the impact of PCMs incorporated in clothing on the thermal comfort of the wearer. Based on the findings, it can be concluded that textiles with PCMs influence the thermal comfort of the wearer; however, the clothing with PCMs indicates only temporary thermal effects. In consequence, when changing the ambient temperature or physical activity, clothing in the combination with phase-change materials only temporarily helps regulating body temperature, providing thermal comfort of the wearer.

Keywords: phase-change materials (PCMs), intelligent textiles, thermal comfort, clothing

Corresponding author:
doc. dr. Damjana Celcar
phone: +386 5 923 5016
e-mail: damjana.celcar@vsd.si

1 Uvod

Na splošno lahko inteligentne (pametne) materiale definiramo kot materiale, ki so zmožni zaznati dražljaje (stimulanse) okolja, se nanje odzvati ter se jim prilagoditi. Ti dražljaji, kot tudi reakcije, so lahko električnega, toplotnega, kemičnega, mehanskega, magnetnega in drugega izvora. Glede na način odzivanja delimo inteligentne materiale v tri skupine [1]:

- pasivni inteligentni materiali lahko le zaznavajo dražljaje iz okolice, torej delujejo kot senzorji, na primer zaznajo zunanjo temperaturo, pH raztopine, beležijo funkcije človeških organov in podobno,
- aktivni inteligentni materiali lahko zaznavajo dražljaje okolja in se nanje odzovejo, torej vsebujejo poleg senzorjev še aktuatorje (sprožilce), ki se na dražljaje iz okolice tudi odzovejo, na primer materiali, ki emitirajo svetlobo, uravnavajo temperaturo kože in drugo, ter
- zelo inteligentni materiali lahko zaznavajo, se odzovejo in se prilagodijo dražljajem zunanje okolice.

Ena pomembnih lastnosti inteligentnih materialov je vsekakor možnost ohranjanja telesne toplote oziroma uravnavanja temperature kože, kakor tudi zagotavljanje toplotne zaščite. Za ta namen so bili razviti fazno spremenljivi materiali (angl. *Phase-Change Materials, PCMs*), ki s spreminjanjem svojega agregatnega stanja in posledično temu s shranjevanjem ter oddajanjem za fazni prehod potrebne latentne toplote omogočajo uravnavanje stalne telesne temperature. Razvoj fazno spremenljivih materialov ali t. i. materialov, ki shranjujejo latentno toploto (angl. *Latent Heat-Storage Materials*), sega v pozna 70. in začetek 80. let prejšnjega stoletja, ko so za potrebe Nase (*NASA – US*, angl. *National Aeronautics and Space Administration*) v laboratorijih iskali rešitve za zaščito vesoljskih instrumentov in astronautov v območju velikih temperaturnih nihanj v vesolju. Pozneje se je njihova uporaba prenesla tudi na oblačila astronautov, oblačila za šport in celo vsakdanja oblačila ter na področje pohištenih ploskih tekstilij, v gradbeništvo, medicino itd. [2].

V prispevku so predstavljene tekstilije s fazno spremenljivimi materiali, ki so jih razvili na podlagi spoznanj, da so sposobne uravnavati enakomerno telesno temperaturo ter s tem ustrezno toplotno fiziološko udobje oblačil. To pomeni, da bi z vgra-

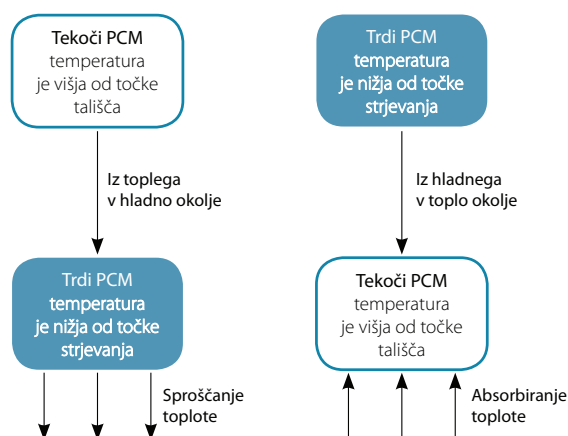
dnjo PCMs v tekstilije in oblačila le-ta pri različnih klimatskih razmerah in različnih telesnih aktivnostih ohranila enakomerno temperaturo telesa in podpirala toplotno fiziološko ravnotežje človeka. Z drugimi besedami lahko rečemo, da bi z vgradnjo PCMs v oblačila poskrbeli za aktivno toplotno regulacijsko delovanje celotnega oblačilnega sistema, ki je sposobno upravljati tok toplote skozi sloje oblačila in ga neposredno prilagajati toplotnim okoliščinam, npr. telesni aktivnosti in obstoječi temperaturi okolice.

Glede na podana izhodišča je v prispevku predstavljeno stanje raziskav vpliva inteligentnih tekstilij z vgrajenimi fazno spremenljivimi materiali na toplotno udobje nošenja oblačil.

2 Mehanizem delovanja fazno spremenljivih materialov (PCMs)

Po eni izmed definicij so PCMs materiali, ki absorbirajo, shranjujejo in sproščajo velike količine energije v obliki latentne toplote, medtem ko so znotraj določenega temperaturnega območja oziroma območja fazne spremembe izpostavljeni faznemu prehodu. Ko materiali prehajajo iz enega agregatnega stanja v drugo (npr. iz trdnega v tekoče ali iz tekočega v trdno agregatno stanje), imenujemo ta proces fazna sprememba (angl. *Phase-Change*), po čemer so ti materiali tudi dobili ime fazno spremenljivi materiali (angl. *Phase-Change Materials, PCMs*) [2]. Prehod iz trdnega v tekoče stanje (proces taljenja) povzroči toploto iz okolja, presežek te toplote fazno spremenljivi materiali absorbirajo (uskладиšči-jo) in jo pri ohlajanju zunanjega okolja s prehodom tekoče faze nazaj v trdno spet sprostijo (proces strjevanja ali kristalizacije) [3]. Mehanizem prehoda iz enega v drugo agregatno stanje fazno spremenljivih materialov je shematsko prikazan na sliki 1.

Poznamo tri osnovne mehanizme prehoda iz ene faze v drugo, in sicer prehod iz trdne v tekočo, iz tekoče v plinasto fazo ter iz trdne v plinasto. Med prehodom iz ene faze v drugo se toplota ali absorbira ali sprošča. To absorbirano ali sproščeno toploto imenujemo latentna toplota [2]. Do fazne spremembe iz trdnega v tekoče pride, ko je v procesu segrevanja (npr. prehod iz hladnega v toplo okolje) ali t. i. procesu taljenja (temperatura je nižja od točke strjevanja) dosežena točka tališča. Med taljenjem fazno spremenljivi materiali absorbirajo in shranju-



Slika 1: Shematski prikaz mehanizma delovanja fazno spremenljivih materialov [3]

jejo določeno količino latentne toplote, ki jo med ohlajanjem (npr. prehod iz toplega v hladno okolje) ali t. i. strjevanjem (temperatura je višja od točke strjevanja) sproščajo v okolje v določenem temperaturnem območju, kjer pride do spremembe faze iz tekočega v trdno, ko je dosežena točka strjevanja. V obeh primerih prehoda iz ene v drugo fazo temperatura materiala ostaja skoraj konstantna [4]. Temperatura tališča teh materialov se giblje v območju od 20 do 40 °C ali celo več, medtem ko se temperatura strjevanja giblje med 30 in 10 °C [2].

2.1 Vrste PCMs

Najpreprostejši primer PCMs je voda, ki pri 0 °C kristalizira, ko preide iz tekoče v trdno obliko (led). Sprememba agregatnega stanja nastane tudi, ko vodo segrejemo na 100 °C, ko izpari in preide v paro [4]. Danes je poznanih več kot 500 naravnih in sintetičnih fazno spremenljivih materialov, ki se med seboj razlikujejo po območju temperature faznega prehoda, kot tudi po svoji toplotni kapaciteti [4].

V namene tekstilne in oblačilne industrije se najpogosteje uporabljajo materiali s fazno spremembo trdno-tekoče, ki jih glede na njihovo sestavo razdelimo na [2]:

- Hidratne anorganske soli (angl. *Hydrated Inorganic Salt*) oziroma hidrati anorganskih soli so kristali soli z n molekulami vode. Zanje je značilna skupina $M \times nH_2O$, kjer je M anorganska spojina, n mnogokratnik in H_2O molekula vode. Kot PCMs materiali se za izdelavo tekstilij in oblačil uporabljajo hidrati soli, katerih temperaturni interval se giblje v območju od 20 do 40 °C

[2]. Ti materiali imajo določene prednosti in tudi slabosti. So netoksični in poceni, kljub temu pa je bilo opaženo nesorazmerno oziroma nekongruentno taljenje, kar pomeni, da se pri taljenju oblikuje nasičena vodna raztopina in trdna faza, ki je navadno nižji hidrat iste soli. Zaradi razlik v gostoti se trdna faza izloči in sede na dno. Temu pojavu pravimo dekompozicija ali ločevanje oziroma super hlajenje soli, ki je slabost teh materialov po večkratnem toplotno/hladilnem ciklusu, saj pojav ni reverzibilen [2, 5]. Ugotovili so, da $LiNO_3 \times 3H_2O$ vzdrži 25 ciklov prehoda iz ene faze v drugo, medtem ko $Na_2SO_4 \times 10H_2O$ zdrži le en ciklus hlajenja/ogrevanja, zato sta njihova uporaba in zmožnost prehoda iz ene v drugo fazo omejeni [5].

- Polihidrogen alkoholi (angl. *Polyhydric Alcohol*) so pogosto uporabljeni PCMs materiali, ki ustvarjajo endotermni in eksotermni efekt v območju temperature daleč pod točko tališča. Tako to absorbirano in sproščeno toploto imenujemo toplota prehoda (angl. *Heat of Transition*). Ker so njihove temperature prehoda višje od 40 °C, ti materiali niso najprimernejši za uporabo v oblačilih. Z mešanjem dveh polihidrogen alkoholov pa je mogoče doseči temperaturo prehoda tudi med 24 in 40 °C [2].
- PEGs (polietilen glikoli) in PTMG (politetrametilen glikol). Polietilen glikol (poliglikol) je eden pomembnejših fazno spremenljivih materialov, katerega temperatura tališča je proporcionalna molekulske masi, ko je njegova molekulska masa manjša od 20 000. PEGs z molekulskimi masami od 800 do 1500 imajo točko tališča okrog 33 °C. Maksimalna teoretična točka tališča PTMG znaša 43 °C, medtem ko je pri PTMG z molekulsko maso 3000 točka tališča okrog 33 °C [2].
- PET-PEG (polietilen tereftalat-polietilen glikol) blok kopolimer. PEG segment kristalizira sam, ko je molekulska masa PEG, uporabljenega v sintezi PET-PEG blok kopolimera, višja od 1540 in vsebnost PEG v kopolimeru znaša 50 %. Točka tališča tega blok kopolimera znaša 6,86 °C. Če pa molekulska masa PEG znaša 4000 in če je vsebnost PEG v kopolimeru 50 %, je točka tališča PEG segmenta v kopolimeru pri 33,05 °C [2].
- Parafini oziroma višji ogljikovodiki so n-alkani z različno dolgimi nerazvejenimi verigami v molekuli, z osnovno formulo C_nH_{2n+2} . So stranski produkt rafinerije nafte, imenovani tudi parafinski

Preglednica 1: Karakteristike fazno spremenljivih parafinov [4]

Fazno spremenljivi parafini	Število ogljikovih atomov	Temperatura tališča [°C]	Temperatura strjevanja [°C]	Latentna toplota [Jg ⁻¹]
n-heksadekan	16	18,2	16,2	237,05
n-heptadekan	17	22,5	21,5	213,81
n-oktadekan	18	28,2	25,4	244,02
n-nonadekan	19	32,1	29,0	222,0
n-eikozan	20	36,1	30,6	246,34
n-heneikozan	21	40,5	/	199,86

voski, ker so po zunanjem videzu podobni pravim voskom. So netoksični, nekorozivni in kemično inertni – neaktivni ter brez neprijetnega vonja. Točka tališča in kristalizacije parafinskih voskov z $n = 16$ do 21 ogljikovimi atomi se gibljeta v temperaturnem območju od 10 do 40 °C in se s podaljševanjem verige povečujeta, preglednica 1 [2, 4]. Latentna toplota narašča z dolžino verige, vendar imajo alkani s sodim številom ogljikovih atomov višjo talilno toploto kot tisti z lihim številom C–atomov. Prednosti parafinov kot PCMs so, da lahko izbiramo med parafini s tališči v širokem temperaturnem območju, hkrati pa imajo tudi relativno visoke vrednosti latentne toplote [2, 5].

- Drugi: neparafinske organske snovi, kot so organske kisline, alkoholi, estri itd., katerih točke tališča se gibljejo med 30 in 65 °C [2].

3 Fazno spremenljivi materiali v tekstilijah

Za zaščito vesoljskih instrumentov in astronautov v območju velikih temperaturnih nihanj v vesolju se je za potrebe Nasa v poznih 70. in v začetku 80. let prejšnjega stoletja začel razvoj fazno spremenljivih materialov, ki se v/na tekstilije lahko vgradijo v nekapsulirani ali kapsulirani obliki [2]. V literaturi zasledimo, da je Ralph H. Hansen leta 1971 patentiral temperaturno prilagodljive tekstilije (angl. *Temperature-Adaptable Fabrics*), ki so vsebovale „napihljive“ votle delce (votli filamenti, kapsule in podobno), napolnjene s plinom in topilom, ki topi plin in se ob spremembi temperature okolice lahko spremeni v tekočo ali trdno fazo [6]. Nadaljnje raziska-

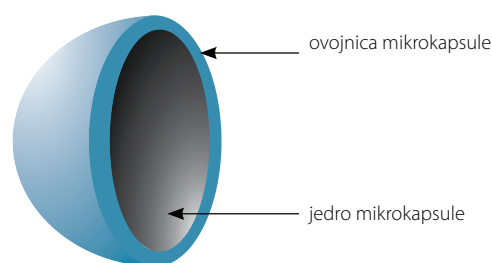
ve temperaturno prilagodljivih materialov segajo v 80. leta prejšnjega stoletja, ko sta Tyrone L. Vigo in Cynthia M. Frost s sodelavci US Department of Agriculture's Southern Regional Reserach Centre iz New Orleansa nekapsulirano fazno spremenljivo hidratno anorgansko sol vključila v votla viskozna in polipropilenska vlakna, ki pa so v več ciklih ogrevanja/ohlajevanja žal izkazovala slabšo toplotno pregrado [7]. Pozneje sta omenjena raziskovalca poskušala z vgradnjo nekapsuliranega polietilen glikola (PEG) kot fazno spremenljivega materiala v votla polipropilenska in viskozna vlakna ter z nanosom PEG na bombažna, volnena, poliestrska in druga vlakna, ki so bila temperaturno prilagodljiva celo po 50 [8] in 150 ciklih ogrevanja/ohlajevanja [9–11]. V 80. in 90. letih prejšnjega stoletja so bile izvedene številne raziskave na področju vključevanja fazno spremenljivih materialov v tekstilije, med njimi lahko omenimo ameriško družbo Triangle Research and Development Corporation (TRDC), ki je raziskovala področje vgrajevanja mikrokapsuliranih ogljikovodikov (parafinov) v/na tekstilije [12–16]. Družba TRDC je v 90. letih prejšnjega stoletja družbi Outlast Technologies, Inc. (takrat Gateway) iz Colorada dovolila pravico do licence tehnologije PCMs, sama pa je naprej razvijala druge izdelke z mikro PCMs, kot je na primer mikroklimatsko hladilno oblačilo [17]. Tako je družba Outlast Technologies Inc. sredi 90. let prejšnjega stoletja razvijala procese vključevanja mikro PCMs v tekstilije [18, 19] in do danes patentirala že več kot 96 patentov s področja temperaturno prilagodljivih materialov [20]. Predstavili so številna uporabna področja tekstilnih izdelkov z vgrajenimi mikro PCMs, od športnih in zaščitnih oblačil do tehničnih tekstilij in tekstilij za dom [20]. Od takrat so bile

izvedene številne raziskave in študije o primernosti vključevanja mikro PCMs v tekstilije. Kot je bilo že omenjeno, se PCMs lahko v/na tekstilije vgradijo v nekapsulirani obliki, kot je na primer vgradnja PEG v vlakna [7–11], ali pa v kapsulirani oziroma mikrokapsulirani obliki (glej tč. 3.1), kot je na primer vgradnja parafinov (na primer heksadekan, heptadekan, oktadekan, nonadekan in eikozan), ki se najpogosteje uporabljajo za vgradnjo v tekstilije [12–20]. Parafini imajo v primerjavi z drugimi materiali zelo velike kapacitete shranjevanja toplote, katerih fazna sprememba se odvija v temperaturnem območju, ki je blizu temperaturi človeške kože. Poleg tega se lahko mešajo z drugimi snovmi tako, da se lahko uravnava želena temperaturno območje fazne spremembe [4, 21]. V preglednici 1 so zbrane karakteristike fazno spremenljivih parafinov, primernih za uporabo v tekstilijah, iz katere je vidno, da se s povečevanjem števila ogljikovih atomov oziroma z daljšanjem verige višajo tudi vrednosti temperature tališča in strjevanja [4].

3.1 Mikrokapsuliranje fazno spremenljivih materialov

Fazno spremenljive materiale je treba pred vgradnjo v tekstilije vgraditi v drobne kroglice t. i. mikrokapsule, velike nekaj mikrometrov, ki morajo biti odporne na mehanske in toplotne obremenitve (toploto, tlak, večino kemikalij, vodo) ter druge vplive, katerim je tekstilni material ali oblačilo izpostavljeno med uporabo ali vzdrževanjem. Ta postopek obdajanja jedrnega materiala z ovojnico se imenuje mikrokapsuliranje (angl. *Microencapsulation*) in poteka na več različnih načinov z mehanskimi (sušenje z razprševanjem, ekstrudiranje, naprševanje v vakuumu, izparevanje topila iz emulzije ipd.) in kemijskimi postopki (koacervacija, medpovršinska polimerizacija/polikondenzacija, in-situ polimerizacija/polikondenzacija) [22]. Mikrokapsule so majhni mikronski delci, sestavljeni iz jedra in ovojnice, slika 2, tako da so mikrokapsule obstojne na mehanske vplive, kot so drgnjenje, pritisk in strig, na toploto in večino kemičnih sredstev [23, 24]. Jedro, ki pomeni od 70 do 90 % velikosti celotne mikrokapsule, je lahko sestavljeno iz ene ali več aktivnih substanc, tekoče, trdne ali plinaste snovi, zaščitna ovojnica pa je sestavljena iz naravnih, polsintetičnih ali sintetičnih materialov in je lahko prepustna ali neprepustna. Za jedrne PCMs se uporabljajo mikrokapsule z ovojnico, ki je neprepustna,

hkrati pa obstojna na mehanske poškodbe, višje temperature in biorazgradnjo [24]. Odvisno od področja uporabe se mikrokapsule razlikujejo v premeru kapsule, debelini in kemični sestavi ovojnice, toplotni prevodnosti, trdnosti, prilagodljivosti in ceni ovojnice ter v tehnološkem postopku priprave [24]. Debelina ovojnice kapsule je lahko manj kot 1 μm , velikost oziroma premer pa lahko variira od 1 μm do več kot 1000 μm , to je odvisno od metode mikrokapsuliranja [24], ponavadi od 20 do 50 μm [5]. Kapsule, ki so večje od 1000 μm , se imenujejo makrokapsule, manjše od 1 μm pa nanokapsule [24]. Zelo majhne mikrokapsule s premerom od 1 do 10 μm se uporabljajo za vgradnjo v tekstilna vlakna med predenjem, medtem ko se večje mikro PCMs-kapsule s premerom od 10 do 100 μm uporabljajo za vgradnjo v poliuretanske pene ali kot nanosi, premazi in impregnacije ploskih tekstilij [4].



Slika 2: Prerez mikrokapsule [23]

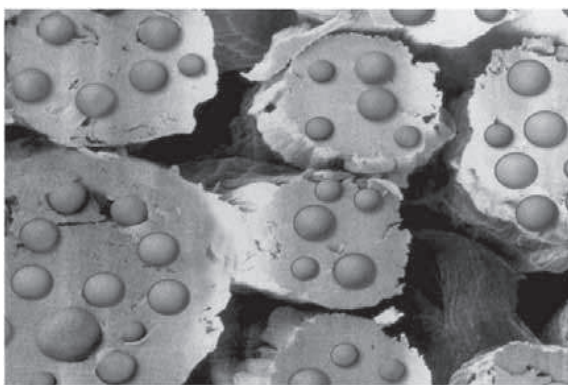
3.2 Vgradnja mikrokapsul PCMs v tekstilije

Za vgradnjo mikrokapsul PCMs v tekstilije se uporabljajo različne tehnike in tehnologije [4]:

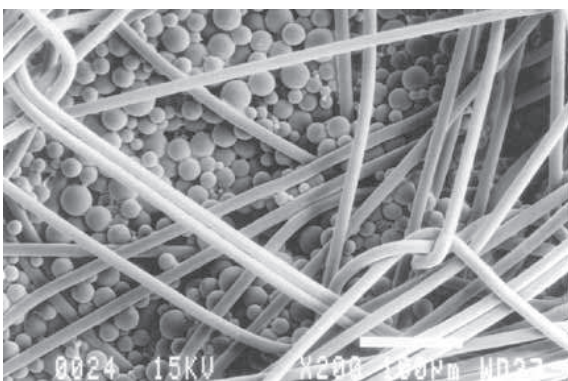
- Vgrajevanje mikro PCMs v vlakna (angl. *Fiber Technology*), kjer se mikrokapsule PCMs dodajo v predilno maso polimera (poliakril, poliester), ki se sprede po konvencionalnem postopku mokrega ali suhega predenja. Na trgu je bilo kot novost predstavljeno bikomponentno vlakno plašč/jedro s poliestrom v plašču in PCMs v jedru [20].
- Vgrajevanje mikro PCMs v vlaknasto strukturo s pomočjo vezivnega sredstva (npr. smole) ali t. i. impregniranje, premazovanje oz. nanašanje (angl. *Coating*), ki se lahko izvaja z različnimi tehnikami nanosa vezivnih sredstev s PCMs, kot so brizganje, tiskanje, z rakli-noži, z gravirnimi valji itd. (angl. *Knife over Roll*, *Knife over Air*, *Screen-printing*, *Gravure Printing*, *Dip Coating*).
- Vgrajevanje mikro PCMs v polnilo in plastenje ali t. i. laminiranje (angl. *Lamination*), kjer so mikrokapsule PCMs dodane v polnilo (termično

utrjena vlaknovina), ki je v procesu laminiranja (združevanja dveh ali več materialov s pomočjo toplote in tlaka) povezan z drugimi komponentami (pletivom, tkaninami ali drugimi tekstilnimi materiali).

Pionirja na področju razvoja tehnologije vgrajevanja mikrokapsul PCMs v vlakna sta Y. G. Bryant in D. P. Colvin, ki sta pod okriljem ameriške družbe TRDC leta 1988 patentirala vlakna, pri katerih so mikrokapsule PCMs (parafini) dodane v predilno maso polimera (na primer poliester, poliakrilil), ki se sprede po konvencionalnem postopku mokrega ali suhega predenja in nato predela v tkanino, pletivo ali netkano tekstilijo [12]. Pozneje sta omenjena raziskovalca s sodelavci patentirala še metodo oziroma tekstilije, kjer so mikro PCMs vgrajene v vlaknasto strukturo s pomočjo vezivnega sredstva oz. z nanašanjem (angl. *Coating*) [14], in vgrajevanje mikro PCMs v polnilo [16]. V 90. letih prejšnjega stoletja je ameriška družba Outlast Technologies, Inc. (takrat Gateway) pridobila pravico do licence PCMs



a)



b)

Slika 3: Fazno spremenljive mikrokapsule Outlast®, vir: © Outlast Technologies, Inc. [20]:

a) vgrajene v akrilna vlakna; b) nanosene na tekstilijo

tehnologije od TRDC in leta 1997 tekstilni industriji predstavila novo generacijo izdelkov s tehnologijo Outlast® Adaptive Comfort® (danes Outlast® Technology) za uporabo v čevljih in rokavicah. Od takrat več kot 300 blagovnih znamk iz različnih držav v svojih izdelkih uporablja fazno spremenljive mikrokapsule Outlast®, imenovane *Thermomolecules™* [20]. Le-te so velike od 10 do 20 μm s kapaciteto shranjevanja od 150 do 200 Jg^{-1} toplote in temperaturo tališča od 18 do 35 °C. Vgrajene so v vlakna (poliakrilil, poliester in viskoza), preje, tkanine in pletiva, lahko so nanesene na različne tekstilije ali v polnila itd. [21, 25]. Slika 3a prikazuje PCMs mikrokapsule Outlast®, vgrajene v akrilna vlakna, na sliki 3b pa je prikazan posnetek tekstilije z nanosom PCMs mikrokapsul Outlast® [20].

4 Fazno spremenljivi materiali in toplotno udobje

Toplotno udobje je definirano kot stanje, ki izraža zadovoljstvo s toplotnim okoljem. To je torej stanje, v katerem ne čutimo ne hladu ne vročine in je gibanje zraka prijetno oziroma ga ne čutimo, ko se zrak ne zdi ne suh ne vlažen in ko nošenja oblačila ne čutimo kot nadlogo [26]. Toplotno udobje pri nošenju oblačila je rezultat uravnovešenega procesa izmenjave toplote med človeškim telesom in okolico, zato je ena najpomembnejših funkcij oblačila, da varuje telo pred zunanjimi vplivi ter da v danih klimatskih razmerah in fizičnih aktivnostih uporabnika podpira toplotno fiziološko ravnovesje pri minimalnih naporih telesa [27, 28]. Z vidika toplotno fiziološkega udobja, kjer je oblačilo opredeljeno kot neklimatska komponenta toplotnega okolja, ki vpliva na toplotno ravnovesje med človekom in okolico, mora oblačilo vzdrževati toplotno pregrado med uporabnikom in okoljem ter tako omogočati normalne aktivnosti v različnih klimatskih razmerah. Kadar oblačila ne ustrezajo danim klimatskim razmeram in telesni aktivnosti človeka, uporabnik čuti toplotno neudobje, v skrajnih primerih pa lahko zaradi toplotnega neravnovesja pride do podhladitve ali pregretja organizma. V hladnem okolju morajo oblačila dajati zaščito telesu pred preveliko izgubo toplote, nasprotno pa morajo v toplem okolju dajati zaščito pred čezmernim pregretjem organizma. To pomeni, da morajo imeti dobre toplotno regulacijske lastnosti [4, 21, 28].

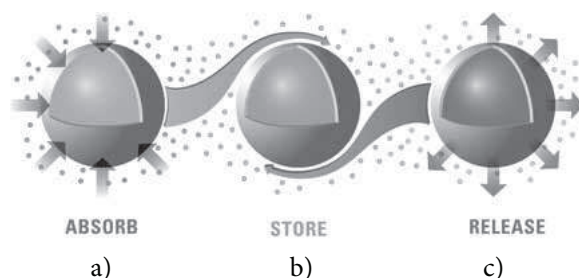
4.1 Toplotno regulacijsko delovanje fazno spremenljivih materialov v oblačilih

Z uporabo fazno spremenljivih materialov v oblačilih, ki so jih razvili na podlagi spoznanj, da so sposobni uravnati enakomerno temperaturo telesa, bi tako poskrbeli za aktivno toplotno regulacijsko delovanje celotnega oblačilnega sistema. To aktivno toplotno regulacijsko delovanje fazno spremenljivih materialov je sposobno upravljati tok toplote skozi sloje oblačila in ga neposredno prilagajati toplotnim okoliščinam, npr. telesni aktivnosti in obstoječi temperaturi okolice [21]. Z vgradnjo mikrokapsul PCMs v ploske tekstilije lahko dosežemo naslednje toplotne učinke [4, 21]:

- učinek ohlajanja (angl. *Cooling Effect*), ko mikrokapsule PCMs absorbirajo odvečno toploto,
- učinek ogrevanja (angl. *Heating Effect*), ko mikrokapsule PCMs sproščajo toploto in
- aktivni toplotneregulacijski učinek, ki je dosežen z nenehnim absorbiranjem in sproščanjem toplote, kar omogoča ohranjanje konstantne temperature telesa.

Na sliki 4 je shematsko prikazano delovanje fazno spremenljivih materialov [20].

Po podatkih iz literature je znano, da če npr. telo proizvaja več toplote, kot je sloji oblačila lahko odvajajo v okolico, to odvečno toploto mikrokapsule PCMs sprejmejo oziroma absorbirajo (slika 4a) in jo hranijo oziroma skladiščijo (slika 4b), kar daje človeku občutek hladu. Nasprotno pa se pri majhnih aktivnostih oziroma v mirovanju, kjer temperatura telesa zaradi temperaturne razlike pada, odvajanje toplote zmanjšuje. Mikrokapsule PCMs sprostito uskladiščeno toploto (slika 4c), kar daje toplejši občutek. Zaradi številnih sprememb aktivnosti, ki se nenehno dogajajo in spreminjajo med



Slika 4: Shematski prikaz toplotno regulacijskega delovanja fazno spremenljivih materialov; vir: © Outlast Technologies, Inc.) [20]

(a – absorbiranje toplote, b – skladiščenje toplote, c – sproščanje toplote)

nošenjem oblačila, mikrokapsule PCMs toploto nenehno absorbirajo ali sproščajo. Poleg tega pa spremembe okolice, npr. ko se ljudje gibljejo iz hladnega v toplo okolje, prav tako povzročijo absorbiranje ali sproščanje toplote mikrokapsul PCMs, kar se odraža v ohranjanju stalne telesne temperature [21, 29]. Intenziteta in trajanje PCMs aktivnega toplotno regulacijskega učinka sta odvisna od kapacitete shranjevanja toplote mikrokapsul PCMs in uporabljene količine mikrokapsul v/na ploskih tekstilijah. Pri izbiri fazno spremenljivih materialov za oblačila je izjemno pomembno tudi poznavanje temperaturnega območja fazne spremembe in da se le-to ujema s temperaturnim območjem uporabe oblačila [21]. Za doseganje želenega toplotno regulacijskega učinka oblačil z vgrajenimi mikro PCMs je treba [4]:

- izbrati primeren fazno spremenljiv material v odvisnosti od kapacitete shranjevanja toplote ter temperature faznega prehoda, ki je odvisna od temperaturnega območja uporabnosti oblačila;
- določiti primerno količino vgrajenih fazno spremenljivih materialov, od katere je odvisna celotna kapaciteta shranjevanja toplote;
- izbrati primerno plosko tekstilijo in dizajn oblačila.

Kot je bilo omenjeno zgoraj, je za doseganje primerne aktivnega toplotno regulacijskega učinka oblačil z vgrajenimi mikro PCMs predvsem treba izbrati primeren fazno spremenljiv material. Z izborom primerne fazno spremenljivega materiala določimo „uporabno območje“ oblačil, saj se npr. pri tekstilijah za spodnje perilo temperature faznega prehoda gibljejo v temperaturnem območju kožne temperature, medtem ko so pri tekstilijah za podlogo vrhnjih oblačil ali za vrhnja oblačila temperature faznega prehoda nižje. Pri določanju primerne količine vgrajenih mikro PCMs, od katere je odvisna celotna kapaciteta shranjevanja toplote, moramo upoštevati, katerim toplotnim okoliščinam, npr. telesni aktivnosti in temperaturi okolice, bodo oblačila z vgrajenimi mikro PCMs namenjena.

Tekstilije z vgrajenimi mikro PCMs morajo hkrati s svojim toplotno regulacijskim učinkom ohraniti tudi osnovne značilnosti konvencionalnih tekstilij, kot so trajnost, trpežnost, uporabne in negovalne lastnosti itd. [4].

5 Stanje raziskav vpliva inteligentnih tekstilij s fazno spremenljivimi materiali na toplotno udobje oblačil

Začetki vgrajevanja fazno spremenljivih materialov v ploske tekstilije segajo v 80. leta prejšnjega stoletja [7–12], namen pa je bil izboljšati toplotno regulacijske lastnosti tekstilij in iz njih izdelanih oblačil. Raziskave zadnjih desetih let temeljijo predvsem na proučevanju toplotnih učinkov tekstilij s fazno spremenljivimi materiali, ki nakazujejo, da tekstilije s PCMs omogočajo doseganje aktivnega toplotno regulacijskega učinka [4, 30–35]. Ti dosežki večinoma temeljijo na razvoju novih metod, merilnih naprav in indeksov, s katerimi je mogoče prikazati delovanje PCMs v tekstilijah, čeprav raziskave temeljijo bolj ali manj na le manjšem kosu ali delu ploske tekstilije. Zelo malo pa je znanega oziroma raziskanega na področju ugotavljanja toplotnih učinkov oblačil, izdelanih iz inteligentnih tekstilij z vgrajenimi fazno spremenljivimi materiali, zato je v nadaljevanju predstavljeno stanje raziskav vpliva PCMs na toplotno udobje uporabnikov oblačil. Znano je, da se za vrednotenje toplotnega udobja pri nošenju oblačil uporabljajo fizikalne in fiziološke metode oz. raziskave. Fizikalne analize oblačil se izvajajo s pomočjo toplotnih lutk oziroma t. i. manikinov ali modelov človeškega telesa, ki simulirajo izmenjavo toplote (tudi znojenje) celotnega dela telesa ali samo določenega dela telesa v prilagojeni klimatski komori. Toplotno fiziološke raziskave udobja pri nošenju oblačil pa se izvajajo s pomočjo testnih oseb, ki v simuliranih ali tudi realnih klimatskih razmerah nosijo testna oblačila, in se jim merijo različni fiziološki parametri, kot so temperatura kože, srčna frekvenca, evaporacija znoja, poraba kisika itd., hkrati pa se subjektivno vrednotijo še ocene toplotnega udobja.

– Študijo vrednotenja toplotnih učinkov fazno spremenljivih materialov v oblačilih na prenos toplote s človeškega telesa v okolje pri različnih temperaturnih spremembah so predstavili H. Shim in drugi s Kansas State University [36]. Za osnovo raziskovanja toplotnih učinkov PCMs so uporabili poliestrsko tekstilijo, premazano s hidrofilno poliuretansko peno, ki je vsebovala 60 % fazno spremenljivih parafinov. Za ta namen so bila izdelana oblačila (majica z dolgimi roka-

vi in dolge oprijete hlače) z nanosom PCMs ali brez njih ter vrhnja smučarska oblačila (jakna in hlače) s PCMs ali brez njih. Prvi del raziskave je temeljil na vrednotenju oblačil s toplotnim manikinom, ki so ga premikali iz ene klimatske komore, ki je simulirala toplo okolje (temperatura zraka 25 °C, 50-% relativna zračna vlažnost in hitrost gibanja zraka 0,2 ms⁻¹), v drugo komoro, ki je simulirala hladno okolje (temperatura zraka 10 °C, 75-% relativna zračna vlažnost in hitrost gibanja zraka 0,2 ms⁻¹). S premikanjem toplotnega manikina iz ene komore v drugo in nazaj (z različnima temperaturama) so ugotavljali, kakšen vpliv imajo eno- in dvoslojna oblačila s PCMs ali brez njih ter smučarska oblačila s PCMs in brez njih na izgubo toplotnega toka toplotnega manikina med temperaturnimi spremembami. Ugotovili so, da toplotni učinek PCMs v oblačilih traja približno 15 minut po tem, ko je bil manikin premaknjen iz ene komore v drugo. Poleg tega je bilo ugotovljeno, da je toplotni manikin, oblečen v enoslojno oblačilo s PCMs, izgubil 6,5 W manj toplote v prvih 15 minutah (premik manikina iz tople v hladno klimatsko komoro) kot oblačilo brez PCMs. Manikin, oblečen v dvoslojno oblačilo PCMs, pa je izgubil 13,2 W manj toplote kot oblačilo brez PCMs pri premiku iz tople v hladno klimatsko komoro. Ko je bil manikin premaknjen iz hladne v toplo klimatsko komoro, je enoslojno oblačilo s PCMs ustvarilo učinek ohlajevanja v povprečju za 7,6 W, dvoslojno oblačilo s PCMs pa za 11,0 W. Smučarska oblačila s PCMs so ustvarila toplotni učinek v povprečju za 5,9 W v prvih 15 minutah, ko je bil manikin premaknjen iz tople v hladno klimatsko komoro. Ko je bil manikin premaknjen iz hladne v toplo klimatsko komoro, je smučarsko oblačilo s PCMs ustvarilo učinek ohlajevanja v povprečju za 7,4 W [36]. Drugi del raziskave, ki sta jo predstavila H. Shim in E. A. McCullough [37], je temeljil na raziskavah toplotno fiziološkega udobja testnih oseb, oblečenih v smučarska oblačila z vgrajenimi PCMs in brez njih. Simuliranje smučanja so razdelili na šest faz, kjer so testne osebe najprej 15 minut sedele v topli komori pri temperaturi zraka 25 °C in 50-% relativni zračni vlažnosti, potem so 15 minut sedele v hladni oziroma mrzli komori pri temperaturi zraka -4 °C in 65-% relativni zračni vlažnosti. V naslednji fazi so testne osebe

- v hladni komori 15 minut hodile po pomičnem traku, potem so spet 15 minut sedele in nato zopet 15 minut hodile po traku v hladni komori. V zadnji fazi so testne osebe ponovno 15 minut sedele v hladni klimatski komori, zatem pa izstopile iz klimatske komore. Med simuliranjem smučanja so testnim osebam merili temperaturo kože ter količino absorbiranega znoja v oblačilih. Poleg tega so osebe ob koncu posamezne faze testa ocenjevale toplotno udobje in počutje v oblačilih. Na podlagi eksperimentalnih podatkov so ugotovili, da statistično pomembne razlike v vrednostih srednje ponderirane temperature kože, izmerjene v oblačilih z vsebnostjo PCMs in brez njih, ne obstajajo in da tudi razlike v ocenjevanju toplotnega udobja ne obstajajo, čeprav so se osebe v oblačilih s PCMs počutile udobneje. Hkrati so ugotovili, da so bile temperature kože na nogi višje, ko so osebe, ki so nosile oblačila s PCMs, stopile iz tople v hladno klimatsko komoro, kar pomeni, da je bil zaznan toplotni učinek ogrevanja [37].
- J. Kim in G. Cho [38] sta za razvoj toplotno regulacijskega materiala oziroma oblačila, ki bi omogočalo toplotno udobje pri različnih telesnih obremenitvah, uporabila fazno spremenljivi oktadekan, nanosen na plosko tekstilijo, da bi ugotovila toplotne in mehanske lastnosti, obstojnost na pranje in toplotnega učinka ploskih tekstilij z vgrajenimi PCMs na fiziološke odzive testnih oseb. Za ta namen so pripravili 100-% PES-tekstilijo z nanosom oktadekana v koncentraciji 5 %, 10 %, 25 % in 40 % v tehniki premazovanja (angl. *Knife-over-roll Coating Process*). Ugotovili so, da se z večanjem koncentracije PCMs toplotne lastnosti, kot so talilna toplota in toplota strjevanja ter temperatura tališča in strjevanja, povečujejo. Najvišji talilni toploti in toploti strjevanja sta bili izmerjeni na tekstiliji s 40-% koncentracijo PCMs in sta znašali $5,7 \text{ Jg}^{-1}$ ter $5,6 \text{ Jg}^{-1}$. Poleg tega je bilo ugotovljeno, da se s pranjem toplotne lastnosti nekoliko znižajo, saj se je talilna toplota po desetih pranjih znižala na 52 do 70 % vrednosti pred pranjem. Največje znižanje toplotnih lastnosti je bilo ugotovljeno po prvem pranju, pri naslednjih pranjih pa so bile spremembe zelo majhne. Pri vrednotenju mehanskih lastnosti z merilno napravo KES-FB so ugotovili, da so največje spremembe upogibnih in strižnih lastnosti opazne pri tekstiliji s 40-% koncentracijo PCMs, saj sta bili upogibna in strižna togost do 400 % višji kot pri tekstiliji brez nanosa PCMs. V raziskavi so poleg lastnosti ploskih tekstilij z vsebnostjo PCMs in brez njih ugotavljali tudi fiziološke odzive testnih oseb, ki so nosile oblačila (majica brez rokavov), izdelana iz 100-% PES ploske tekstilije z nanosom 40-% koncentracije PCMs in brez nanosa PCMs. Testiranje s pomočjo testnih oseb je potekalo v klimatski komori pri temperaturi zraka $21 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ in relativni zračni vlažnosti $50 \pm 5 \%$ ter hitrosti gibanja zraka $0,1 \text{ ms}^{-1}$, kjer so se osebe najprej 20 minut aklimatizirale, potem so 10 minut tekle po tekočem traku, 10 minut sedele, pet minut ponovno tekle po tekočem traku, na koncu pa so osebe še 15 minut mirovale. Med testiranjem v klimatski komori so vsako minuto beležili temperaturo kože testnih oseb, temperaturo mikroklimе (tj. medprostor med kožo in oblačilom) na prsih in hrbtu ter vlažnost mikroklimе na hrbtu. Poleg tega so testne osebe med testiranjem v intervalu petih minut ocenjevale toplotno udobje po Ashraejevi lestvici [39]. Pri vrednotenju rezultatov meritev testnih oseb je bilo ugotovljeno, da razlike v srednji ponderirani temperaturi kože in temperaturi mikroklimе, izmerjeni v oblačilih z vsebnostjo PCMs in brez njih, obstajajo in da so vrednosti temperatur v oblačilih s PCMs nekoliko nižje, predvsem med hojo in po hoji, s čimer je bil v oblačilih s PCMs dosežen toplotni učinek ohlajevanja. Čeprav se subjektivne ocene toplotnega udobja bistveno med seboj niso razlikovale, je bilo ugotovljeno, da so se testne osebe nekoliko udobneje počutile v oblačilih z vsebnostjo PCMs [38].
 - Tudi H. Chung in G. Cho [40] sta raziskovala toplotne lastnosti ploskih tekstilij s PCMs in fiziološke odzive iz njih izdelanih oblačil, da bi razvili udobna in funkcionalna oblačila za prosti čas. V raziskavi so raziskovalci uporabili paroprepusten in vodoneprepusten 100-% poliamid z nanosom PCMs ali brez njih. V prvem delu raziskave so bile raziskane fizikalne lastnosti ploskih tekstilij in toplotne lastnosti z diferencialno dinamično kalorimetrijo (DSC), v drugem delu pa so bili raziskani fiziološki parametri toplotnega udobja testnih oseb in subjektivne ocene, ki so jih osebe podale med testiranjem v klimatski komori. Toplotne lastnosti 100-% poliamida, premazanega s poliuretanom z

10-% koncentracijo oktadekana, so bile določene z DSC-kalorimetrijo, s katero so ugotovili temperaturo tališča tekstilije pri 29,06 °C, temperaturo strjevanja pa pri 11,45 °C. Izmerili so tudi talilno toploto tekstilije, ki je znašala 13,50 Jg⁻¹, in toploto strjevanja, ki je znašala 14,02 Jg⁻¹. Poleg tega so ugotavljali, kako pranje vpliva na toplotne lastnosti, kjer so ugotovili, da so se toplotne lastnosti s pranjem zmanjševale. Te so po 30 pranjih znašale le še okoli 60 % (po 30 pranjih je talilna toplota znašala 8,0 Jg⁻¹). Za določanje toplotno fiziološkega odziva testnih oseb so bila izdelana oblačila s PCMs in brez njih, ki so jih testne osebe nosile med testom v klimatski komori pri temperaturi zraka 21 ± 1 °C in 50 ± 5-% relativni zračni vlažnosti ter hitrosti gibanja zraka 0,1 ms⁻¹. Testiranje v klimatski komori je potekalo v štirih fazah: osebe so najprej pet minut sedele, nato so 10 minut hodile po pomičnem traku, zatem so pet minut tekle, 10 minut ponovno hodile po traku in na koncu 10 minut mirovale. Med testiranjem so beležili temperaturo kože na sedmih mestih telesa, temperaturo mikroklimе oblačila na prsih ter vlažnost mikroklimе na hrbtu. Poleg tega so testne osebe med testiranjem v intervalu petih minut ocenjevale toplotno udobje po Ashrajevi lestvici [39]. Na podlagi raziskave toplotno fiziološkega udobja testnih oseb, ki so nosile oblačila z vsebnostjo PCMs in brez njih, je bilo ugotovljeno, da statistično pomembne razlike v srednji ponderirani temperaturi kože, izmerjeni v oblačilih s PCMs in brez njih, obstajajo, in sicer v drugi, tretji in zadnji fazi testa. Po končani drugi periodi testa je bilo ugotovljeno večje znižanje srednje temperature kože v oblačilih s PCMs, tako da je v naslednjih fazah testa le-ta bila nižja od temperature kože, izmerjene v oblačilih brez PCMs. To pomeni, da je v oblačilih s PCMs prišlo do učinka ohlajevanja, ki se kaže v znižanju temperature kože. Tudi temperatura mikroklimе oblačila je bila v oblačilih z vgrajenimi PCMs statistično pomembno nižja od temperature, izmerjene v oblačilih brez PCMs. Rezultati toplotno fiziološkega udobja testnih oseb so pokazali, da razlike med ocenami toplotnega udobja testnih oseb niso statistično pomembne, je pa kljub temu bilo zabeleženo, da so se osebe nekoliko udobneje počutile v oblačilih z vgrajenimi PCMs [40].

- Študijo vpliva fazno spremenljivih materialov na toplotno udobje zaščitnih oblačil v hladnem okolju so predstavili S.-X. Wang in drugi s hongkonške politehnične univerze [41]. V raziskavi, izvedeni s testnimi osebami pri temperaturi zraka -15 °C, so uporabili dve vrsti štirislojnih zaščitnih oblačilnih sistemov s PCMs in brez njih ter ugotovili, da zaščitna oblačila v kombinaciji s PCMs statistično pomembno izkazujejo višje vrednosti temperature v ušesu (angl. *Ear Canal Temperature*) in nižje vrednosti sprememb temperature ob spremembi temperature okolice in telesne aktivnosti. Hkrati je bilo ugotovljeno, da so se testne osebe med nošenjem zaščitnih oblačil s PCMs počutile udobneje [41].
- Proučevanja vpliva fazno spremenljivih materialov na toplotno udobje nošenja oblačil se je lotila tudi D. Celcar [42], ki je raziskovala, kakšen vpliv imajo poslovna oblačila z vgrajenimi PCMs na toplotno fiziološko udobje uporabnikov v različnih klimatskih razmerah nošenja. V raziskavi so bile proučene toplotne lastnosti tekstilij in oblačil z modeli, ki simulirajo delovanje človeške kože, ter raziskani parametri toplotno fiziološkega udobja s pomočjo testnih oseb, ki so v različnih klimatskih razmerah in pri različni telesni aktivnosti nosila poslovna oblačila z vgrajenimi PCMs in brez njih. Raziskava je bila izvedena pri različnih umetno ustvarjenih klimatskih razmerah v računalniško vodeni klimatski komori pri temperaturi zraka od 25 °C do -5 °C (s petstopinjskim razponom) in telesni aktivnosti, ki je čim bolj ustrezala realnim razmeram nošenja poslovnih oblačil, tj. sedenju in hoji po pomičnem traku s hitrostjo 3,5 kmh⁻¹. Vpliv posameznih oblačil in različnih klimatskih razmer na toplotno fiziološko udobje nošenja je bil eksperimentalno določen kot sprememba treh fizioloških parametrov: ponderirane temperature kože, srčne frekvence ter količine evaporiranega in absorbiranega znoja v oblačilih, medtem ko je bil vpliv posameznih poslovnih oblačil na subjektivni občutek udobja pri nošenju določen s pomočjo ocenjevalnih skal v obliki vprašalnikov, na katere so testne osebe odgovarjale pred raziskavo, med njo in po njej. V raziskavi je bilo ugotovljeno, da poslovni oblačilni sistemi v kombinaciji s PCMs ne vplivajo pomembno na toplotno regulacijo telesa, saj so zaznani le krat-

kotrajni toplotni učinki, ki se odražajo v rahlem povišanju ali znižanju temperature kože med nošenjem oblačil. Pri tem je bilo ugotovljeno, da se zaznane razlike v vrednostih temperature kože gibljejo v povprečju okoli 0,5 °C, kar pomeni razmeroma majhen vpliv na uravnavanje temperature kože, ki pa ga ne gre zanemariti. Hkrati je bilo ugotovljeno, da so se pri nekaterih temperaturah zraka osebe, ki so nosile oblačila s PCMs, počutile udobneje [42].

6 Sklepi

Fazno spremenljivi materiali, vgrajeni v tekstilije, se ne uporabljajo samo v oblačilni industriji za oblačila, ki varujejo pred mrazom in vročino (športna oblačila, delovna in zaščitna oblačila, oblačila za prosti čas, rokavice, nogavice in spodnje perilo, čevlji itd.), temveč tudi za medicinske (povoji pri opeklinah, vroče/hladne terapije) in higienske izdelke (posteljne vzmetnice in vzglavniki), izdelke v gradbeništvu (vgradnja v stavbe, fasade, zavese itd.), avtomobilski industriji (prevleke za sedeže) itd. s skupnim ciljem zagotoviti ustrezno udobje človeka.

Čeprav je v literaturi zaslediti številne raziskave, ki nakazujejo, da tekstilije s PCMs omogočajo doseganje aktivnega toplotno regulacijskega učinka, je iz pregleda raziskav pri proučevanju vplivov na toplotno udobje človeka videti, da so bili raziskani le učinki PCMs, vgrajenih v smučarska oblačila, oblačila za prosti čas, zaščitna in poslovna oblačila. Iz pregleda raziskav je bilo ugotovljeno, da:

- Toplotni učinek PCMs v oblačilih (majica z dolgimi rokavi in oprijete dolge hlače ter smučarska vrhna oblačila) traja približno 15 minut po tem, ko je bil toplotni manikin premaknjen iz ene v drugo klimatsko komoro (iz temperature zraka 25 °C v 10 °C in nasprotno) in da je toplotni manikin, oblečen v oblačila s PCMs, v prvih 15 minutah izgubil manj toplote kot v oblačilih brez PCMs, kar nakazuje, da je bil ob spremembi temperature zraka dosežen toplotni učinek ogrevanja ali ohlajanja [36].
- Pri raziskavah toplotno fiziološkega udobja testnih oseb, oblečenih v smučarska oblačila z vgrajenimi PCMs in brez njih, ni bilo zaznanih pomembnih razlik v vrednostih temperature kože in subjektivnih ocenah toplotnega udobja, dobljenih v hladnem okolju pri temperaturi zra-

ka -4 °C, čeprav so se testne osebe v oblačilih s PCMs počutile udobneje. Hkrati je bilo ugotovljeno, da so bile temperature kože na nogi višje, ko so osebe, ki so nosile oblačila s PCMs, stopile iz tople v hladno klimatsko komoro, kar pomeni, da je bil zaznan toplotni učinek ogrevanja [37].

- V oblačilih (majica brez rokavov) s PCMs je bil dosežen toplotni učinek ohlajanja, saj so bile predvsem med hojo in po hoji zaznane nekoliko nižje vrednosti temperatur kože kot v oblačilih brez PCMs. Hkrati je bilo ugotovljeno, da se subjektivne ocene toplotnega udobja, dobljene pri temperaturi zraka 21 °C, med seboj niso razlikovale in da so se kljub temu testne osebe nekoliko udobneje počutile v oblačilih s PCMs [38].
- Toplotni učinek ohlajanja je bil zaznan v funkcionalnih oblačilih za prosti čas (paroprepustna in vodoodporna oblačila iz poliamida) z nanosom PCMs, saj so bile ob spremembi telesne aktivnosti zaznane nižje vrednosti temperature kože in mikroklima med oblačilom in kožo pri vrednotenju fizioloških odzivov testnih oseb med testiranjem pri temperaturi zraka 21 °C. Razlike v subjektivnih ocenah toplotnega udobja testnih oseb, ki so nosile oblačila s PCMs in brez njih, niso bile zaznane, je pa bilo ugotovljeno, da so se osebe nekoliko udobneje počutile v oblačilih s PCMs [40].
- Zaščitna oblačila v kombinaciji s PCMs izkazujejo višje vrednosti temperature v ušesu in nižje vrednosti sprememb temperature ob spremembi temperature okolice in telesne aktivnosti. Hkrati je bilo ugotovljeno, da so se testne osebe med nošenjem zaščitnih oblačil pri temperaturi zraka -15 °C počutile udobneje kot v oblačilih brez PCMs [41].
- Poslovna oblačila z vgrajenimi PCMs ne vplivajo pomembno na toplotno regulacijo telesa in kažejo le kratkotrajni toplotni učinek, ki se odraža v rahlem povišanju ali znižanju temperature kože med nošenjem oblačil. Hkrati je bilo ugotovljeno, da so se pri nekaterih temperaturah zraka osebe, ki so nosile oblačila s PCMs, počutile udobneje [42].

Na podlagi podanih ugotovitev lahko sklepamo, da tekstilije z vgrajenimi PCMs vplivajo na toplotno udobje pri nošenju oblačil, saj večina raziskav navaja, da so se testne osebe pri nošenju oblačil s PCMs počutile udobneje kot v oblačilih brez PCMs in da so ob spremembi telesne aktivnosti in/ali tempera-

ture okolice zaznane majhne spremembe v temperaturi telesa. Vendar je treba poudariti, da so zaznani le kratkotrajni toplotni učinki, kar pomeni, da ob spremembi temperature okolice ali telesne aktivnosti oblačila s PCMs le kratkotrajno pripomorejo k uravnavanju telesne temperature. To pomeni, da je zaznano le kratkotrajno toplotno regulacijsko delovanje oblačil z vgrajenimi PCMs, ki ga bo treba še raziskati in opredeliti, predvsem pa natančneje načrtovati in razvijati, ne samo tekstilije s PCMs, temveč celotna oblačila in oblačilne sisteme.

7 Viri

1. TAO, X. Smart technology for textiles and clothing – introduction and overview. V: *Smart fibres, fabrics and clothing*. Uredila Tao, X. Cambridge, England : Woodhead Publishing Ltd, 2001, p. 1–6.
2. ZHANG, X. Heat-storage and thermo-regulated textiles and clothing. V: *Smart fibres, fabrics and clothing*. Uredila Tao, X. Cambridge, England : Woodhead Publishing Ltd, 2001, p. 34–57.
3. MEINANDER, H. Smart and intelligent textiles and fibers. V: *Textiles in sport*. Uredil Shishoo, R. Woodhead Publishing Limited in association with The Textile Institute. Cambridge, England : Woodhead Publishing Limited, 2005, p. 120–133.
4. BENDKOWSKA, W. Intelligent textiles with PCMs. V: *Intelligent textiles and clothing*. Uredil Mattila, H.R. Cambridge, England : Woodhead Publishing Ltd, 2006, p. 34–62.
5. SARIER, N., ONDER, E. A. Comparative study of thermally enhanced fabrics based on the microencapsulation techniques used. V: *International Scientific Conference Intelligent Ambience and Well-Being, 19–20 of September 2005*, Tampere, Finland.
6. HANSEN, R. H. *Temperature adaptable fabrics*. United States Patent Office, US 3,607,591.1971.
7. VIGO, T. L., FROST, C. E. Temperature-sensitive hollow fibers containing phase change salts. *Textile Research Journal*, 1982, vol. 52 (10), p. 633–637.
8. VIGO, T. L., FROST, C. E. Temperature-adaptable fabrics. *Textile Research Journal*, 1985, vol. 55 (12), p. 737–743.
9. VIGO, T. L. et al. *Temperature adaptable textile fibers and method of preparing same*. United States Patent Office, US 4,851,291.1989.
10. VIGO, T. L., FROST, C. M. *Temperature-adaptable textile fibers and method of preparing same*. United States Patent Office, US 4,871,615.1989.
11. VIGO, T. L. et al. *Temperature adaptable textile fibers and method of preparing same*. United States Patent Office, US 4,908,238. 1990.
12. BRYANT, Y. G., COLVIN, D. P. *Fiber with reversible enhanced thermal storage properties and fabrics made therefrom*. United States Patent Office, US 4,756,958. 1988.
13. COLVIN et al. *Method of using thermal energy absorbing and conducting potting materials*. United States Patent Office, US 5,224,356. 1993.
14. BRYANT, Y. G., COLVIN, D. P. *Fabric with reversible enhanced thermal properties*. United States Patent Office, US 5,366,801. 1994.
15. COLVIN et al. *Heat shield*. United States Patent Office, US 5,290,904. 1994.
16. COLVIN et al. *Thermally enhanced foam insulation*. United States Patent Office, US 5,637,389. 1997.
17. COLVIN et al. *Micro-climate cooling garment*. United States Patent Office, US 5,415,222. 1995.
18. PAYNE et al. *Thermal barriers for buildings, appliances and textiles*. United States Patent Office, US 5,532,039. 1996.
19. PUSHAW, R. J. *Coated skived foam and fabric article containing energy absorbing phase change materials*. United States Patent Office, US 5,677,048. 1997.
20. OUTLAST [svetovni splet]. Dostopno na spletu: www.outlast.com [28. 02. 2006; 14. 12. 2006; 28. 12. 2011].
21. MÄKINEN, M. Introduction to phase change materials. V: *Intelligent textiles and clothing*. Uredil Mattila, H.R. Cambridge, England : Woodhead Publishing Ltd, 2006, p. 21–33.
22. STAREŠINIČ, M., ŠUMIGA, B., BOH, B. Mikrokapsuliranje za tekstilno uporabo in uporaba analize SEM posnetkov za vizualizacijo mikrokapsul. *Tekstilec*, 2011, let. 54 (4–6), str. 80–103.
23. KUKOVIČ, M., KNEZ, E., PIPAL, V. Mikrokapsule za tekstilno industrijo. *Tekstilec*, 1998, let. 41 (7–8), str. 225–230.
24. STANKOVIČ ELESINI, U., KNEZ, E., LESKOVŠEK, M. Vgrajevanje mikrokapsul v tekstil-

- na vlakna. *Tekstilec*, 2004, let. 47 (5–6), str. 175–184.
25. LOBODA, M. Outlast – Regulacija temperature. V: *Zbornik 36. simpozij o novostih v tekstilstvu: Tekstilije za šport in prosti čas, Ljubljana, 2. junij 2005*. Ljubljana : Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za tekstilstvo, 2005, str. 74–91.
 26. ISO 7730: 2005. *Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria*. International Organization for Standardization, Geneva, 2005.
 27. Geršak, J. Designing a garment system from the point of view of thermophysiological comfort. V: Katalinić B. (ur.). *12th DAAAM International Symposium. Annals of DAAAM for 2001 & Proceedings of the 12th International DAAAM Symposium "Intelligent manufacturing & automation: focus on precision engineering"*, Jena University of Applied Sciences, 24–27th October 2001, Jena, Germany. Vienna : DAAAM International, 2001, p. 157–158.
 28. MECHEELS, J. *Körper-Klima-Kleidung: Wie funktioniert unsere Kleidung?* Berlin : Shiele & Schön, 1998.
 29. CELCAR, D., GERŠAK, J. Inteligentne tekstilije in oblačila. *Tekstilec*, 2004, let. 47 (7–8), str. 232–242.
 30. BENDKOWSKA, W., TYSIAK, J., GRABOWSKI, L., BLEJZYK, A. Determining temperature regulating factor for apparel fabrics containing phase change material. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 2005, vol. 17 (3/4), p. 209–214.
 31. CHOI, K., CHO, G., KIM, P., CHO, C. Thermal storage/release and mechanical properties of phase change materials on polyester fabrics. *Textile Research Journal*, 2004, vol. 74 (4), p. 292–296.
 32. GHALI, K., GHADDAR, N. in HARATHANI, J., JONES, B. Experimental and numerical investigation of the effect of phase change materials on clothing during periodic ventilation. *Textile Research Journal*, 2004, vol. 74 (3), p. 205–214.
 33. LI, Y. in ZHU, Q. A Model of Heat and Moisture Transfer in Porous Textiles with Phase Change Materials. *Textile Research Journal*, 2004, Vol. 74 (5), p. 447–457.
 34. YING, B., KWOK, Y., LI, Y., ZHU, Q., YEUNG, C. Assessing the performance of textiles incorporating phase change materials. *Polymer Testing*, 2004, vol. 23, p. 541–549.
 35. HES, L., LU, B. I. A new tester for evaluation of thermal efficiency of PCM fabrics in real conditions of use. V: *Proceedings of 37th International Symposium on novelties in Textiles, 15-17 June 2006*. Ljubljana : Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za tekstilstvo, 2007.
 36. SHIM, H., MCCULLOUGH, E. A., JONES B.W. Using phase change materials in clothing. *Textile Research Journal*, 2001, vol. 71 (6), p. 495–502.
 37. MCCULLOUGH, E. A., SHIM, H. The use of phase change materials in outdoor clothing. V: *Intelligent textiles and clothing*. Uredil Mattila, H. . Cambridge, England : Woodhead Publishing Ltd, 2006, p. 63–81.
 38. KIM, J., CHO, G. Thermal storage/release, durability and temperature sensing properties of thermostatic fabrics treated with octadecane-containing microcapsules. *Textile Research Journal*, 2002, vol. 72 (12), p. 1093–1098.
 39. *Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria*. ISO 7730: 2005.
 40. CHUNG, H., CHO, G. Thermal Properties and Physiological Responses of Vapor-Permeable Water-repellent Fabrics Treated with Microcapsule-Containing PCMs. *Textile Research Journal*, 2004, Vol. 74, No. 7, str. 571-575.
 41. WANG, S.-X. et al. Effect of Phase Change Materials on Temperature and Moisture Distributions in Clothing during Exercise in Cold Environment. *Journal of Fiber Bioengineering and Informatics*, 2008, vol. 1 (1), p. 29–40.
 42. CELCAR, D. *Vpliv fazno spremenljivih materialov v poslovnih oblačilih na toplotno fiziološko udobje : doktorska disertacija*, 2008. Maribor : Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo.