

# Związki zmiennofazowe w zastosowaniach techniczno-użytkowych i ergonomicznych



W artykule przedstawiono podstawowe informacje nt. związków zmiennofazowych (PCM), a także w skrócie możliwości ich aplikacji w poszczególnych dziedzinach nauki i praktyki: w budownictwie, transporcie, przemyśle rolno-spożywczym, przemyśle samochodowym, chemicznym czy medycynie. W szczególności skupiono się na omówieniu możliwości wykorzystywania PCM w celu redukcji obciążenia cieplnego człowieka poprzez zastosowanie związków zmiennofazowych w tekstyliach czy kamizelkach chłodzących.

## Phase change materials in technical-usable and ergonomic applications

The basic information about phase change materials (PCM) and also briefly about the possibility of their applications in various fields of science and practice: in construction, transport, agro-food industry, automotive, chemical or medicine, are presented into this article. In particular, the focus was on discussing about the possibility of using PCM in order to reduce the thermal load through using phase change materials in textiles and cooling vests.

## Wstęp

W czasie aktywności fizycznej w organizmie człowieka produkowane jest ciepło, które w idealnych warunkach powinno być w całości oddane do otoczenia. W środowisku gorącym oddawanie ciepła do otoczenia jest utrudnione, na skutek czego w organizmie człowieka może dojść do akumulacji ciepła, co przekłada się na wzrost jego temperatury wewnętrznej. Z tej przyczyny od lat poszukiwane są rozwiązania, które mogłyby charakteryzować się zdolnością do odbierania dużej ilości ciepła z organizmu i być z łatwością aplikowane na stanowiskach pracy.

Jedną z opracowanych koncepcji jest stosowanie elementów odzieży zawierających związki zmiennofazowe (PCM-ang. *Phase Change Materials*), które podczas zmiany stanu skupienia ze stałego na ciekły pobierają ciepło z otoczenia, a w przypadku transformacji w drugą stronę – oddają pobrane ciepło. PCM mogą zatem posłużyć zarówno do schładzania, jak i ogrzewania innych ciał. Związki te stosowane są m.in. w przemyśle włókienniczym, ale ich właściwości doceniono również w budownictwie, energetyce, medycynie itp.

W artykule przedstawiono podstawowe informacje na temat PCM, a także, pokrótce, możliwości ich zastosowania w różnych dzie-

dzinach nauki i w praktyce – szerzej natomiast omówiono możliwość wykorzystywania PCM do redukcji obciążenia cieplnego człowieka.

## Związki zmiennofazowe (PCM) i ich rodzaje

Związki zmiennofazowe (inaczej: materiały przemiany fazowej) absorbują, akumulują oraz uwalniają duże ilości energii w zakresie temperatur przemiany fazowej (temperatura topnienia i krzepnięcia). Podczas przemiany w stan ciekły (temperatura topnienia) PCM pochłaniają i akumulują duże ilości ciepła od najbliższego otoczenia. Przez cały czas, gdy ciepło jest pochłaniane, temperatura PCM jest stała. Związki te mogą zatem być używane np. do ochrony organizmu człowieka przed wytwarzaną nadmierną ilością ciepła [1, 2].

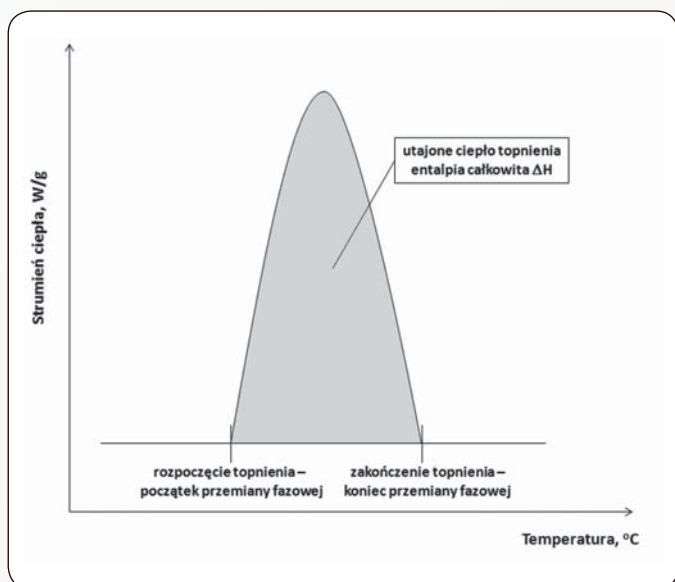
Bardzo ważnymi parametrami opisującymi PCM są: entalpia całkowita (entalpia topnienia i krzepnięcia, zwana inaczej ciepłem utajonym) oraz przewodność cieplna. W czasie procesu zmiany fazy, za możliwości akumulowania bądź oddawania ciepła odpowiada wartość entalpii całkowitej  $\Delta H$  (ciepło utajone; entalpia topnienia i krzepnięcia, rys. 1.). Przewodność cieplna odpowiedzialna jest za efektywne

pochłanianie lub uwalnianie ciepła nawet przy niewielkich różnicach temperatury.

W 1983 r. A. Adhat sklasyfikował materiały magazynujące energię. Podzielił je, uwzględniając źródło ciepła, na 3 klasy główne z uwagi na: ciepło jawne, utajone oraz uzyskane z przemian chemicznych. Podklasy ciepła utajonego zależą od rodzaju przemian fazowych. Interesujące nas PCM przechodzą z fazy stałej do ciekłej (i odwrotnie). Związki te następnie podzielić można na organiczne i nieorganiczne. Do organicznych zaliczamy: parafiny (alkany) oraz kwasy tłuszczowe, do nieorganicznych – uwodnione sole [3]. Obecnie do organicznych materiałów magazynujących energię zalicza się również ciecze jonowe [2].

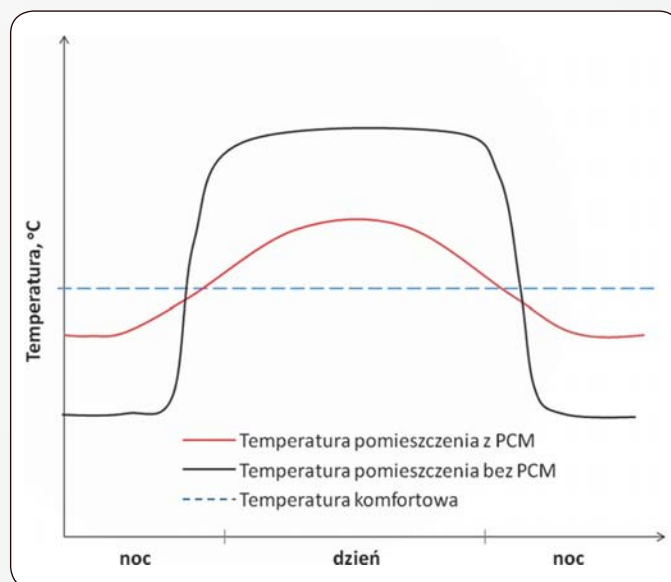
Parafiny (alkany) cechują się wysokim ciepłem utajonym ( $\Delta H \approx 250$  kJ/kg), są stabilne chemicznie, ich temperaturę topnienia można „kontrolować”, podczas syntezyowania związku PCM, poprzez regulację liczby atomów węgla w łańcuchu cząsteczki, oraz nie ulegają przechłodzeniu<sup>1</sup>. Wadą parafin jest wysoka cena, niska odporność na zapa-

<sup>1</sup> Przechłodzenie to ochładzanie cieczy do temperatury niższej niż temperatura topnienia. Ten stan określa się mianem cieczy przechłodzonej i jest to stan termodynamicznie niestabilny – nie jest możliwa wówczas prawidłowa krystalizacja [4].



Rys. 1. Schemat termogramu przemiany fazowej PCM uzyskanego na dyferencyjnym kalorymetrze skaningowym (DSC) [1]

Fig. 1. Diagram of a phase change obtained on a differential scanning calorimeter (DSC) [1]



Rys. 2. Schemat wykorzystania właściwości PCM w budownictwie [5]

Fig. 2. Diagram on using the properties of PCM in construction [5]

lenie oraz niska przewodność cieplna. Kwasy tłuszczowe charakteryzują się niższym ciepłem utajonym ( $\Delta H \leq 200$  kJ/kg) i wysokimi wartościami temperatury topnienia.

Ciecze jonowe są to substancje ciekłe składające się wyłącznie z jonów. Cechują się małą prężnością par, są niepalne, stabilne termicznie oraz przyjazne dla środowiska. Charakteryzuje je jednak niższa wartość ciepła utajonego ( $\Delta H \approx 160$  kJ/kg).

Organiczne PCM mają bardzo wiele zalet, m.in. niski bądź zerowy efekt przechłodzenia podczas przemiany fazowej oraz nie powodują korozji metali. Charakteryzują się jednak niską przewodnością cieplną (0,15–0,30 W/mK), dużą rozszerzalnością objętościową podczas przemian fazowych i są, niestety, łatwopalne (tab. 1.), [3].

Uwodnione sole oraz woda cechują się wysokim ciepłem utajonym ( $\Delta H_{H_2O} \approx 330$  kJ/kg), lecz nie są stabilne termicznie. Istnieje też duże prawdopodobieństwo, że ulegną rozdzielaniu faz [2], wynikiem czego może być nieefektywne działanie danego związku. Charakteryzują się również wyższą pojemnością cieplną w porównaniu z organicznymi PCM. Nieorganiczne PCM często ulegają przechłodzeniu oraz wywołują korozję. Znalazły zastosowanie głównie

w urządzeniach służących do magazynowania energii słonecznej (tab. 2.), [3].

### Techniczne i użytkowe zastosowania PCM

Ze względu na swoje właściwości do magazynowania ciepła, PCM znalazły zastosowanie w wielu dziedzinach, w których pożądane jest odbieranie ciepła z otoczenia i oddawanie go w późniejszym czasie. Poniżej przedstawiono niektóre zastosowania.

#### Budownictwo

PCM w budownictwie najczęściej wykorzystywane są do poprawy efektywności energetycznej budynków i pomieszczeń. Działanie ich polega na pobieraniu i akumulowaniu nadmiaru ciepła w ciągu dnia oraz uwalnianiu w nocy i usuwaniu nadmiaru ciepła np. przez układy wentylacyjne (rys. 2.), [5].

Materiały PCM wkomponowane są w strukturę budynku, co zwiększa jego pojemność cieplną – czyli zdolność do akumulacji ciepła. Przyczynia się to do poprawy efektywności energetycznej, czyli zmniejszenia zużycia energii niezbędnej do utrzymania warunków komfortu cieplnego [6].

Ciepło utajone materiałów stosowanych w budownictwie mieści się w zakresie od 100 do 250 kJ/kg. Temperatura przemiany fazowej powinna mieścić się w zakresie wartości temperatur występujących w danym miejscu. PCM stosowane na ścianach i stropach powinny cechować się temperaturą topnienia o  $\pm 3$  °C wyższą, niż średnia temperatura w pomieszczeniu. W przypadku PCM wspomagających np. ogrzewanie podłogowe różnica ta może wynosić nawet 60 °C.

Produkty handlowe mogą występować w postaci np. płyt gipsowo-kartonowych lub torebek wypełnionych PCM [6].

Istnieje również możliwość łączenia PCM z materiałem budowlanym. Z reguły odbywa się to poprzez bezpośrednie mieszanie surowego materiału PCM z cementem lub gipsem już w procesie produkcyjnym, nasycanie porowatych elementów, np. cegieł, przez ich zanurzenie w stopionym PCM, mieszanie mikrogranulatu PCM (kapsułek) z cementem lub gipsem w procesie produkcji, albo wytwarzanie płyt laminowanych (np. wełna mineralna) z ciekłą wewnętrzną warstwą materiału PCM [7].

Materiały zmienno fazowe stosowane w budownictwie charakteryzują się zwykle

Tabela 1. Podstawowa charakterystyka fizykochemiczna wybranych organicznych związków zmienno fazowych

Table 1. Basic physicochemical characteristics of selected organic PCMs

Symbol	Nazwa	Temperatura topnienia °C	Ciepło utajone kJ/kg
C-16	Alkany	18	236
C-18	Alkany	28	244
Stearynian butylu	Estry kw. tłuszczowych	18-23	200

Tabela 2. Podstawowa charakterystyka fizykochemiczna wybranych nieorganicznych związków zmienno fazowych

Table 2. Basic physicochemical characteristics of selected non-organic PCMs

Symbol	Nazwa	Temperatura topnienia °C	Ciepło utajone kJ/kg
H <sub>2</sub> O	Zw. nieorganiczne	0	335
CaCl <sub>2</sub> *6H <sub>2</sub> O	Uwodnione sole	29	190
55-65% LiNO <sub>3</sub> *3H <sub>2</sub> O + 35-45% Ni (NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> *6H <sub>2</sub> O	Mieszanka uwodnionych soli	24	230

małą przewodnością cieplną, a zmieszanie z gipsem lub cementem jeszcze bardziej obniża tę wartość. Wszystko to sprawia, że tego typu elementy działają mało efektywnie. W celu polepszenia charakterystyki termicznej stosuje się np. wypełniacze o wysokiej przewodności cieplnej, żebrowania lub struktury porowate [6, 7].

#### Transport

Od lat, w celu przetransportowywania zimnych napojów czy mięs, stosowało się pojemniki wypełnione lodem – to nic innego jak zastosowanie PCM (lód) w transporcie. Zaletami takiego rozwiązania są m.in. niezależność od energii elektrycznej, jak i bezgłośnie działanie [8].

Obecnie PCM wykorzystuje się do transportu surowych bądź przetworzonych produktów spożywczych, leków termowrażliwych i zimnych napojów, które wymagają przechowywania w określonej temperaturze [8]. Wkłady PCM stosuje się również w transporcie towarów szybko psujących się, elementów elektronicznych (np. transformatorów zapłonowych) i substancji chemicznych wymagających kontrolowanej temperatury (np. transportu w chłodni), [3].

Systemy chłodnicze są zazwyczaj napędzane silnikiem spalającym olej napędowy. Zastosowanie PCM powoduje mniej zanieczyszczeń, chłodzenie jest też bardziej ekonomiczne [3]. W niektórych miejscach wręcz niedozwolone bądź niemożliwe jest podłączenie lodówek lub chłodni do prądu (np. ładownie na lotniskach, wnętrza samolotów) – wtedy wkłady z PCM są idealnym rozwiązaniem [3, 8].

Obecnie oferowanych jest wiele pojemników z PCM, służących do transportu posiłków, napojów lub środków medycznych. Pojemniki z odpowiednim PCM są ogólnie dostępne i mogą być umieszczane również w wózkach z lodami lub zimnymi albo gorącymi napojami [3].

Transport ciepłych posiłków wymaga źródła ciepła. Nie zawsze istnieje możliwość użycia elektrycznego źródła ciepła – w takich przypadkach PCM zapewnia doskonałą samoregulację temperatury. Jednym z obecnie stosowanych rozwiązań jest np. podgrzewacz do pizzy. Jedną z firm zajmujących się PCM wyprodukowała talerz, który pozwala utrzymywać temperaturę posiłku powyżej 65 °C, trzykrotnie wydłużając czas dostarczenia jeszcze gorącego zamówienia [3, 8].

Niektóre posiłki (np. sałatki, surówki, świeże warzywa, owoce) wymagają niższej temperatury przechowywania. Dzięki transportowi w specjalnych wózkach z wkładami z PCM, stołówki szkolne lub szpitalne mogą zawsze zapewnić dobrą jakość wydawanych posiłków.

#### Przemysł rolno-spożywczy

Stała, kontrolowana temperatura podczas produkcji wina lub produktów mlecznych jest bardzo ważna. Rośliny hodowane w szklarniach wymagają do prawidłowego rozwoju stałej, określonej temperatury otoczenia. Jest to utrudnione z powodów dużych wahań temperatury w ciągu dnia i nocy. By zapewnić pożądane warunki, stosuje się klimatyzatory bądź urządzenia grzewcze. Zastosowanie PCM pozwala wyeliminować lub ograniczyć stosowanie dodatkowych urządzeń<sup>2</sup> [3].

#### Elektronika

Większość urządzeń elektronicznych najefektywniej pracuje w określonym zakresie temperatur: za wysoka lub zbyt niska temperatura może wpłynąć nie tylko na samo działanie urządzenia, lecz również na jego żywotność [8].

Obwody elektroniczne, serwerownie lub pomieszczenia z innymi urządzeniami elektronicznymi z reguły są izolowane i klimatyzowane, w celu utrzymania stałej temperatury i niedoprowadzenia do przegrzania urządzeń, a tym samym do awarii. PCM mogą posłużyć w tym wypadku jako dodatkowe zabezpieczenie, które w czasie awarii będzie odbierać i magazynować ciepło. W momencie dostępności źródła zasilania dokończą cykl przemian, oddając zmagazynowane ciepło, by móc znów pracować w momencie kolejnej awarii<sup>2</sup> [3].

#### Samochody osobowe

Niektóre koncerny samochodowe stosują PCM w celu przechowywania nadmiaru ciepła wydzielanego podczas pracy silnika. Ciepło to jest następnie oddawane do zimnego silnika przy kolejnym uruchomieniu, co powoduje szybsze rozgrzanie, a tym samym lepszy przebieg spalania, a także przekazywane jest do wnętrza samochodu, poprawiając komfort termiczny podczas jazdy. Dzięki wyposażeniu w akumulator ciepła utajonego<sup>2</sup> (PCM) i doskonałą izolację, urządzenie to może utrzymać energię cieplną przez 2 dni przy temperaturze otoczenia -20 °C [3].

#### Przemysł chemiczny

W przemyśle chemicznym PCM mogą być stosowane jako „zabezpieczenie” podczas gwałtownych, niekontrolowanych reakcji egzotermicznych. Dzięki odbieraniu nadmiaru ciepła wydzielonego podczas reakcji chemicznych, PCM łagodzi przebieg impulsywnych zjawisk. Wiele reakcji chemicznych wymaga prowadzenia w ściśle określonej temperaturze otoczenia. PCM mogą być pomocne

<sup>2</sup> <http://teappcm.com/applications.htm>, dostępne 10.10.2011 r.

w utrzymywaniu stałej, pożądanej temperatury podczas prowadzenia tych reakcji<sup>2</sup> [3].

#### Medycyna

Komercyjnie dostępne są również izolowane skrzynki lub pudełka wypełnione PCM, które służą do transportu żywych kultur bakterii czy narządów ludzkich. Oferowane są w kilku rozmiarach, o różnorodnej wartości temperatury docelowej (od -40 °C do +18 °C)<sup>2</sup> [3].

PCM wykorzystywane są również do transportu krwi, która musi być utrzymywana w odpowiednim zakresie temperatur, gdyż zmrożenie czy przegrzanie wyklucza ją z dalszego użycia. Jednym z rozwiązań tego problemu mogą być pudełka oferowane przez wyspecjalizowane firmy zawierające materiały zmiennofazowe, które pozwalają na bezproblemowy, prosty i tani transport krwi, bez żadnych problemów technicznych (zakres utrzymywanej temperatury: 2 ÷ 10 °C przez co najmniej 12 h), [8].

#### Tekstylika

Historia wyrobów włókienniczych z materiałami przemiany fazowej rozpoczęła się w NASA. Wykorzystano je tam do produkcji kombinezonów dla astronautów, w celu poprawienia ochrony przed wahaniami temperatury w otwartej przestrzeni kosmicznej. Zainspirowało to naukowców do dalszych badań. W 1988 r. D.P. Colvin i Y.G. Bryant przedstawili koncepcję wytwarzania włókien zwierających kapsułki z PCM. W latach 90. XX w. naukowcy z firm Frisby Technologies i Outlast Technologies opracowali kilka sposobów umieszczania mikrokapsulek PCM w wyrobach tekstylnych [9, 10]. Większość przeprowadzonych badań zastosowania tej odzieży dotyczyła operacji militarnych, dlatego też wyniki nie były publikowane w czasopiśmie naukowych.

Niestety, tkaniny Outlast posiadają pewną wadę – cechują się niskim ciepłem utajonym. Stosowane włókna poliakrylonitrylowe zawierają jedynie 5÷10% PCM, dlatego nie są w stanie skutecznie zredukować obciążenia termicznego (efekt redukcji jest wprost proporcjonalny do ilości użytego PCM). Ich entalpia całkowita wynosi 4,2 ÷ 8,4 J/g. Z kolei tkaniny typu Lyocell składają się w 33% z PCM, a 47% z włókna wiskozowego. Entalpia całkowita w tym przypadku wynosi 60 J/g [11, 13]. Na całym świecie trwają badania nad zastosowaniem nowych związków chemicznych jako PCM.

Aby zapobiec migrowaniu PCM w strukturze włókna, poddaje się je mikroenkapsulacji. Polega ona na zamykaniu mikroskopowej ilości substancji aktywnej w cienkiej otoczce polimerowej, zwiększając tym samym trwałość oraz

bezpieczeństwo posługiwania się związkami chemicznymi.

Wyróżniamy makro- i mikrokapsułki PCM. Makro-PCM najczęściej mają wymiar rzędu 1 ÷ 4 mm i stosowanie są w odzieży noszonej blisko ciała, natomiast mikro-PCM mogą mieć średnicę od ok. 0,5 do 1000 nm.

## Zastosowanie PCM do redukcji obciążenia cieplnego

Właściwości grzewcze PCM zostały wykorzystane w tzw. *pocket heaters*<sup>3</sup>, które głównie wypełnione są uwodnionymi solami. Wkłady te podgrzewa się samodzielnie, doprowadzając je do stanu ciekłego, np. we wrzącej wodzie. *Pocket heaters* wydzielają ciepło, przechodząc w stan stały. Wykorzystywana jest tutaj jedna z cech uwodnionych soli, mianowicie preferencje do tzw. *subcooling*, czyli występowania cieczy przechłodzonych. Brak prawidłowej krystalizacji powoduje wydłużenie czasu działania wkładów. *Pocket heaters* znalazły zastosowanie wśród osób spędzających dużo czasu na zewnątrz pomieszczeń, np. myśliwych, rybaków, żeglarzy. *Pocket heaters* zostały również wykorzystane w Garmisch Partenkirchen w Niemczech, podczas akcji ratowniczej, w celu ogrzewania leżących na śniegu, niemogących się poruszać ludzi [8].

Mikrokapsułki z PCM zamknięte we włóknach tkaniny Outlast pozwalają na produkcję zarówno odzieży, jak i bielizny. Tkanina Outlast znalazła zastosowanie w odzieży motocyklowej (także w rękawicach, butach [8] czy kaskach motocyklowych [12]), stosowana jest też w odzieży specjalistycznej (np. sportowej) oraz przeznaczonej do użytku codziennego: w bieliźnie, koszulkach dla maratończyków i cyklistów, pościeli, poduszkach, materacach i śpiworach [8].

Kapsułki z PCM stosuje się w specjalnych kamizelkach, używanych przez sportowców [13], strażaków i żołnierzy [8]. Kapsułki umieszczane są zwykle w specjalnych tunelach utworzonych w odzieży [14]. Innym zastosowaniem PCM w strukturze odzieży są paczki lub woreczki zawierające związki zmienno fazowe [15].

Obecnie na rynku dostępnych jest wiele kamizelek zawierających PCM. Są to m.in. wyroby z systemem chłodzącym, zaopatrzone w kanaliki z wodą. Według danych producenta, sama kamizelka waży średnio 1,8 ÷ 2,3 kg; zastosowany PCM cechuje się temperaturą krzepnięcia ~18 °C, natomiast wartość temperatury topnienia wynosi 37,7 °C.

Według producentów, kamizelka utrzymuje chłodzące działanie przez 2 godziny<sup>4</sup>. W innego typu komercyjnie dostępnych kamizelkach zastosowano system chłodzący, zbudowany z 8 woreczków wypełnionych żelzem z PCM<sup>5</sup>. Temperatura krzepnięcia użytego PCM to 32 F (~ 0 °C), natomiast w temperaturze 58 F (~14,5 °C) ulega przemianie fazowej. Wg producentów, efekt działania kamizelki utrzymuje się od 2 do 4 godzin<sup>5</sup>. Kamizelki te mogą być stosowane do każdego rodzaju sportu, m.in. ćwiczeń fitness, boks, wschodnich sztuk walki<sup>5</sup> itp.

Kamizelki z PCM charakteryzującym się stabilnymi warunkami w 15 °C znalazły zastosowanie w pracy w przemyśle, ale także mogą być przydatne podczas aktywnego odpoczynku lub rekreacji. Zaprojektowano również kamizelki dla psów w celu schłodzenia ich skóry w gorącym klimacie<sup>6</sup>.

## Podsumowanie

Związki zmienno fazowe znajdują szerokie zastosowanie we wszystkich dziedzinach życia, w których ważne jest odbieranie i akumulowanie ciepła.

W bezpieczeństwie pracy elementy te są głównie wykorzystywane przy tworzeniu odzieży ochronnej, która stanowi barierę przed termicznie niekorzystnymi warunkami środowiska pracy, a jednocześnie nie powoduje nadmiernego obciążenia cieplnego organizmu. Dotychczas problemem przy stosowaniu PCM w odzieży ochronnej była znaczna masa kamizelek, co z jednej strony wpływało na lepsze odbieranie ciepła, z drugiej zaś powodowało dodatkowe obciążenie organizmu. Z tej przyczyny zaleca się, aby po zakończeniu działania PCM (ok. 2 godzin) kamizelka była zdejmowana lub zastępowana nową, schłodzoną. Tego rodzaju problem nie występuje w kombinizonach lub innych elementach odzieży, gdzie PCM zamknięty jest we włóknach. Rozwiązanie to jednak nie odbiera tak znacznej ilości ciepła, jak to ma miejsce w przypadku kamizelek lub wkładów zawierających PCM.

Wykorzystanie PCM dynamicznie się rozwija, tworzone są nowe rodzaje tych materiałów, coraz lepiej dopasowane do zastosowania w odzieży, przy jednoczesnej dużej pojemności cieplnej. To powoduje, że można oczekiwać dalszych, innowacyjnych rozwiązań zwiększających bezpieczeństwo i komfort pracy w środowisku gorącym.

## PIŚMIENNICTWO

- [1] S. Mondal *Phase change materials for smart textiles – an overview*. "Appl. Thermal Engineering", 28, 1536-1550, 2008
- [2] W. Streicher *Advanced Storage Concepts: Phase Change Materials*. The International Energy Agency – The Solar Heating and Cooling Programmes (IEA SHC), task 32 C, 2007
- [3] B. Zalba et al. *Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and application*. "Applied Thermal Engineering", 23, 251-283, 2003
- [4] [http://pl.wikipedia.org/wiki/Ciecz\\_%C5%82odzona](http://pl.wikipedia.org/wiki/Ciecz_%C5%82odzona) dostępne w dn. 10.10.2011 r.
- [5] M. Jaworski *Zastosowanie materiałów zmienno fazowych do zwiększania bezwładności cieplnej budynków*, Politechnika Warszawska, Instytut Techniki Ciepłej; 18.10.2010 r. [www.izolacje.com.pl](http://www.izolacje.com.pl), budownictwo, przemysł, ekologia; [http://www.izolacje.com.pl/artukul/id16\\_zastosowanie-materialow-zmienno-fazowych-pc-m-do-zwiekszenia-bezwladnosci-cieplnej-budynkow](http://www.izolacje.com.pl/artukul/id16_zastosowanie-materialow-zmienno-fazowych-pc-m-do-zwiekszenia-bezwladnosci-cieplnej-budynkow) dostępne w dniu 10.10.2011 r.
- [6] M. Jaworski *Materiały zmienno fazowe (PCM) w budownictwie – właściwości i rodzaje*. Politechnika Warszawska, Instytut Techniki Ciepłej; 18.10.2010 r. [www.izolacje.com.pl](http://www.izolacje.com.pl), budownictwo, przemysł, ekologia; [http://www.izolacje.com.pl/artukul/id408\\_materiały-zmienno-fazowe-pcm-w-budownictwie-wlasciwosci-i-rodzaje](http://www.izolacje.com.pl/artukul/id408_materiały-zmienno-fazowe-pcm-w-budownictwie-wlasciwosci-i-rodzaje) dostępne w dniu 10.10.2011 r.
- [7] M. Jaworski *Materiały zmienno fazowe w elementach konstrukcyjnych ścian i podłóg*. Politechnika Warszawska, Instytut Techniki Ciepłej; 10.11.2010 r. [www.izolacje.com.pl](http://www.izolacje.com.pl), Budownictwo, przemysł, ekologia. [http://www.izolacje.com.pl/artukul/id183\\_materiały-zmienno-fazowe-w-elementach-konstrukcyjnych-ścian-i-podlog](http://www.izolacje.com.pl/artukul/id183_materiały-zmienno-fazowe-w-elementach-konstrukcyjnych-ścian-i-podlog) dostępne w dniu 10.10.2011 r.
- [8] H. Mehling, L. Cabeza *Heat and cold storage with PCM: An up to date introduction into basics and application*.; ISBN 978-3-540-68556-2; Springer, 2008
- [9] W. Bendkowska *Zastosowanie technologii mikroenkapsulacji we włókiennictwie. Cz. III Ochrona niestabilnych związków chemicznych*. „Przegląd Włókienniczy” 6, 28-31, 2006
- [10] W. Bendkowska *Badania komfortu fizjologicznego odzieży zawierającej materiały przemiany fazowej*. „Przegląd Włókienniczy”, 5, 39-43, 2007
- [11] G. Bartkowiak, I. Frydrych, A. Kurczewska *Sprawozdanie etapowe, Opracowanie projektu modeli płaskich wyrobów włókienniczych z materiałami przemian fazowych*. CIOP-PIB [3.R.03], 2009
- [12] F. Tan, S. Fok *Cooling of helmet with phase change material*. "Applied Thermal Engineering" 26, 2067-2072, 2006
- [13] G. Bartkowiak *Kierunki rozwoju odzieży inteligentnej*. „Bezpieczeństwo Pracy” 1 (460), 2010
- [14] W. Bendkowska, M. Kłonowska, K. Kopias, A. Bogdan *Badania skuteczności kamizelek chłodzących zawierających materiały przemiany fazowej za pomocą manekina termicznego*. „Polski Przegląd Medycyny Lotniczej”, nr 4, tom 14, październik-grudzień, 371-383, 2008
- [15] N. Nishihara et al. *A cooling vest for working comfortably in a moderately hot environment*. "Journal of Physiological Anthropology and Applied Human Science", 75-82; 2001

*Publikacja opracowana na podstawie wyników II etapu programu wieloletniego pn. „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w latach 2011-2013 w zakresie zadań służb państwowych przez Ministerstwo Pracy i Polityki Społecznej. Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.*

<sup>4</sup> [http://defense-update.com/features/du-2-07/infantry\\_armor\\_cooling.htm](http://defense-update.com/features/du-2-07/infantry_armor_cooling.htm) dostępne w dniu 10.10.2011 r.

<sup>5</sup> <http://www.hyperwear.com/hyper-vest-cool-med-pcm.html> dostępne w dniu 10.10.2011 r.

<sup>6</sup> <http://www.coolvest.com/cooling-vest-product-information/> dostępne w dniu 10.10.2011 r.

<sup>3</sup> *Pocket heaters* – wkłady grzewcze wypełnione PCM, w postaci niewielkich i poręcznych paczek, o różnorodnym kształcie