



mgr inż. AGNIESZKA GRESZTA (ORCID: 0000-0003-0183-5301)  
 dr inż. ANNA DĄBROWSKA (ORCID: 0000-0003-4295-3005)  
 dr inż. MAGDALENA MŁYNARCZYK (ORCID: 0000-0002-9218-9781)  
 mgr inż. MONIKA KOBUS (ORCID: 0000-0003-3217-1050)  
 Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy  
 Kontakt: [aggre@ciop.lodz.pl](mailto:aggre@ciop.lodz.pl)  
 DOI: 10.54215/BP.2023.06.13.Greszta

# Model odzieży ciepłochronnej z funkcją termoregulacji, wykorzystującej aerożel i materiały przemiany fazowej (PCM) – badania wstępne

Fot. Mila\_22 79/Bigstockphoto



Dobór odzieży ciepłochronnej dla pracowników, którzy wykonują czynności o różnym wydatku energetycznym lub są narażeni na znaczne zmiany temperatury podczas pracy, stanowi istotny problem. Aby ograniczyć obciążenie cieplne pracowników oraz poprawić ergonomię odzieży, w Centralnym Instytucie Ochrony Pracy – Państwowym Instytucie Badawczym opracowano model innowacyjnej kurtki ciepłochronnej z dodatkiem wysokoizolacyjnego, lekkiego aerożelu oraz PCM. Opracowaną odzież oceniano pod względem ciepłochronności (izolacyjności cieplnej) oraz efektywności chłodzenia na podstawie wyników badań gęstości strumienia ciepła z manekina termicznego. Uzyskane zwiększenie wartości strumienia ciepła w obszarach z PCM bezpośrednio po założeniu kurtki świadczy o efekcie chłodzenia manekina, aczkolwiek efekt ten utrzymuje się tylko przez ok. 5-10 minut. Wyniki izolacyjności cieplnej wskazują, że działanie aerożelu jest najbardziej skuteczne w tych obszarach kurtki, w których występuje on samodzielnie (bez PCM).

*Słowa kluczowe: aerożel, materiały przemiany fazowej, PCM, odzież chroniąca przed zimnem, odzież ciepłochronna, komfort cieplny*

## Model of thermal-insulating clothing with thermoregulation function, using aerogel and phase change materials (PCM) – preliminary study

The selection of thermal-insulating clothing for employees performing activities with different energy expenditures or exposure to significant temperature changes during work is a relevant problem. To reduce the heat load of employees and improve the ergonomics of clothing, a model of the innovative thermal-insulating jacket with the addition of highly insulating, lightweight aerogel and PCM was developed in Central Institute for Labour Protection – National Research Institute. The developed clothing was evaluated in terms of thermal insulation and cooling efficiency based on the results of tests of the heat flux density from the thermal manikin. The obtained increase in the heat flux density value in the areas with PCM immediately after putting on the jacket shows the cooling effect of the manikin. However, this effect lasts only for about 5-10 minutes. The results of thermal insulation measurements indicate that the aerogel is most effective in the areas of the jacket where it is present alone (without PCM).

*Keywords: aerogel, phase change materials, PCM, protective clothing against cold, thermal-insulation clothing, thermal comfort*

## Wstęp

Praca w środowisku zimnym stanowi duże obciążenie cieplne dla organizmu człowieka. Ze względu na konieczność ograniczenia strat ciepła z organizmu i uchronienia pracownika przed wyziębieniem pracodawca jest zobowiązany zapewnić mu odpowiednio dobraną odzież ciepłochronną, dostosowaną do warunków środowiska termicznego i intensywności wysiłku. Nie jest to proste zadanie, zwłaszcza na stanowiskach, na których pracownik podczas zmiany roboczej wykonuje czynności o różnym poziomie wydatku energetycznego lub jest narażony na duże zmiany temperatury w krótkim przedziale czasowym, np. podczas transportu produktów z magazynów do chłodni.

Skutecznym rozwiązaniem takiego problemu może być zastosowanie odzieży aktywnej o zmiennej izolacyjności cieplnej, np. zawierającej materiały przemiany fazowej (ang. *phase change materials* – PCM). Są to głównie uwodnione sole lub parafiny (alkany), które zmieniają swój stan skupienia (np. ze stałego w ciekły i odwrotnie), wykazując przy tym zdolność absorbowania, magazynowania i uwalniania dużej ilości energii w ściśle określonym zakresie temperatury [1]. Zadaniem PCM w odzieży jest regulowanie temperatury w mikroklimacie pododzieżowym, a przede wszystkim odbieranie nadmiaru ciepła z organizmu człowieka w celu ograniczenia jego obciążenia cieplnego [2]. W sytuacji zwiększonego wysiłku fizycznego lub znacznego wzrostu temperatury otoczenia dochodzi do akumulacji ciepła w organizmie i wzrostu temperatury skóry. Wówczas PCM zastosowane w odzieży zaczynają się topić, odbierając przy tym nadmiar ciepła z organizmu użytkownika i zapewniając podstawowe parametry komfortu cieplnego.

Efektywność chłodzenia odzieży z PCM może być oceniana m.in. na podstawie wyników badań gęstości strumienia ciepła z manekina termicznego. Młynarczyk z zespołem [3] zastosowała tę metodę do oceny koszulki z makrokapsułkami PCM dla ratowników górniczych. Badania w temperaturze

32°C wykazały, że testowana koszulka skutecznie obniża temperaturę powierzchni manekina, powodując tym samym zwiększenie gęstości strumienia ciepła przez pierwsze 20 minut od założenia. Co ciekawe, wykazano, że dzięki dodatkowemu zastosowaniu odzieży wierzchniej efekt chłodzenia był lepszy, gdyż średnia gęstość strumienia ciepła w tym wariancie wyniosła ok. 32 W/m<sup>2</sup>, natomiast w wariancie z samą koszulką z PCM – 15 W/m<sup>2</sup>.

Podobne badania prowadziła wcześniej Bendkowska i in. [4]. Dotyczyły one trzech wariantów kamizelek chłodzących z makrokapsułkami PCM w zestawie z jednorazowym kombinezonem chroniącym przed chemikaliami. Wyniki eksperymentu wykazały, że w temperaturze 20°C najlepszy i najdłuższy efekt chłodzenia zapewnia mieszanka alkanów: heksadekanu (C16) i oktadekanu (C18). W tym przypadku strumień ciepła dostarczanego do manekina osiągnął stan równowagi dopiero po ok. 150 minutach, podczas gdy w przypadku kamizelki z C16 było to ok. 110 minut, a kamizelki z C18 – tylko ok. 90 minut.

Tjønnås i in. [5] porównywali z kolei efekt chłodzenia swetra z włókien przedzionych ze stopu z PCM oraz swetra z wymiennymi pakietami z PCM. Początkowo większy strumień ciepła z powierzchni manekina zaobserwowano w przypadku pierwszego swetra, ale już po 4,5 minuty nastąpił jego radykalny spadek poniżej 5 W/m<sup>2</sup>. Choć sweter z pakietami PCM był bardziej masywny, a PCM pokrywały mniejszą powierzchnię manekina, to czas trwania efektu chłodzenia był znacznie dłuższy. Wyniki te wskazują, że efektywność chłodzenia odzieży z PCM zależy przede wszystkim od masy wprowadzonego PCM i jego utajonego ciepła topnienia<sup>1</sup>, a w mniejszym stopniu od powierzchni zajmowanej w odzieży.

Odzież ciepłochronna oprócz właściwości ochronnych (tj. ochrony przed zimnem) musi zapewniać ergonomię, w tym przede wszystkim swobodę ruchów. W przypadku tego typu odzieży, zwłaszcza przeznaczanej do stosowania w bardzo niskich temperaturach, poważnym problemem jest zapewnienie kompromisu między utrzymaniem wysokiego poziomu ochrony przed zimnem a komfortem jej użytkowania. Zwykle, aby osiągnąć wymaganą izolacyjność odzieży, stosuje się grube, wielowarstwowe układy materiałów, co skutkuje jej zwiększoną masą i objętością. Wykazano, że nadmierna grubość i masa odzieży nie tylko powoduje ograniczenie zakresu ruchów, lecz także zwiększa obciążenie fizyczne i wydatek energetyczny pracownika podczas wykonywania czynności zawodowych [6, 7].

Szansą na poprawę ergonomii odzieży ciepłochronnej może być zastosowanie nowego, ultralekkiego materiału izolacyjnego o nazwie aerożel. Składa się on w ponad 90% z powietrza i wyróżnia

<sup>1</sup> Utajone ciepło topnienia – ciepło potrzebne do zmiany stanu skupienia ciała/substancji ze stałego w ciekły, bez wpływu na temperaturę tego ciała/tej substancji (źródło: <http://pracownicy.uwm.edu.pl/wojsob/pliki/dydaktyka/td-03.pdf>).

Tabela 1. Charakterystyka materiałów tekstylnych zastosowanych w kurtce  
Table 1. Characteristics of the textile materials used in the jacket

Materiał	Tkanina SIP (jako warstwa zewnętrzna i podszewka)	Włóknina z PCM
Skład surowcowy	100% PA + powłoczenie PU	100% PES + powłoczenie akrylowe z mikrokapsułkami PCM
Masa powierzchniowa <sup>*)</sup> [g/m <sup>2</sup> ]	19 ± 0	163 ± 1
Grubość <sup>**)</sup> [mm]	0,03 ± 0,01	0,53 ± 0,02
<sup>*)</sup> Według PN-EN 12127:2000 Tekstylija – Płaskie wyroby włókiennicze – Wyznaczanie masy na jednostkę powierzchni z zastosowaniem małych próbek. <sup>**)</sup> Według PN-EN ISO 5084:1999 Tekstylija – Wyznaczanie grubości wyrobów włókienniczych.		

Tabela 2. Charakterystyka aerożelu zastosowanego w kurtce<sup>2</sup>  
Table 2. Characteristics of the textile materials used in the jacket

Skład	[(trimetylosililo)oksy]-modyfikowana krzemionka
Wielkość cząstek [µm]	100-700
Średnica porów [nm]	~ 20
Gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]	120-150
Charakter chemiczny powierzchni	hydrofobowy
Przewodność cieplna [W/m·K]	0,012 (w 25°C)

wyjątkowo niską przewodnością cieplną (zwykle nieprzekraczającą 0,02 W/m·K) [8]. Fenomen aerożelu wynika z jego bardzo rozbudowanej, porowatej struktury, która utrudnia przepływ ciepła [9]. Dzięki takiej budowie aerożel wykazuje znacznie lepsze właściwości termoizolacyjne od obecnie stosowanych materiałów ocieplających, a nawet lepsze od nieruchomego powietrza [10].

Badania przeprowadzone przez Nuckols z zespołem [11] wykazały, że dzięki zastosowaniu aerożelowej warstwy izolującej w kombinezonach dla nurków można uzyskać nawet o 76% wyższą izolacyjność cieplną niż w kombinezonach z powszechnie stosowaną włókniną Thinsulate o masie powierzchniowej 400 g/m<sup>2</sup> i zbliżonej grubości. Kombinezon z dodatkiem aerożelu charakteryzował się podobną grubością do kombinezonu zawierającego włókninę Thinsulate, natomiast jego masa była o ok. 0,2 kg wyższa.

Naukowcy z Uniwersytetu w Leeds w Wielkiej Brytanii [12], stosując technologię igłowania wodnego, wytworzyli cienką dwuwarstwową włókninę z kanałami wypełnionymi aerożelem, przeznaczoną m.in. do stosowania w odzieży chroniącej przed zimnem. Badania opracowanego materiału na ogrzewanej płycie wykazały, że temperatura na powierzchni kanałów z aerożelem była średnio o 2,5°C niższa w porównaniu z kanałami wypełnionymi powietrzem, co wskazuje, że aerożel skuteczniej zabezpiecza przed stratami ciepła.

Korzystny wpływ aerożelu na kształtowanie właściwości izolacyjnych materiałów tekstylnych potwierdziły również badania prowadzone przez innych naukowców [13-17].

Obecnie na rynku dostępne są już różnego rodzaju cienkie materiały kompozytowe z aerożelem do zastosowań odzieżowych [18]. Jednakże ich istotną wadą jest brak zdolności przepuszczania powietrza i pary wodnej, co ma negatywny wpływ

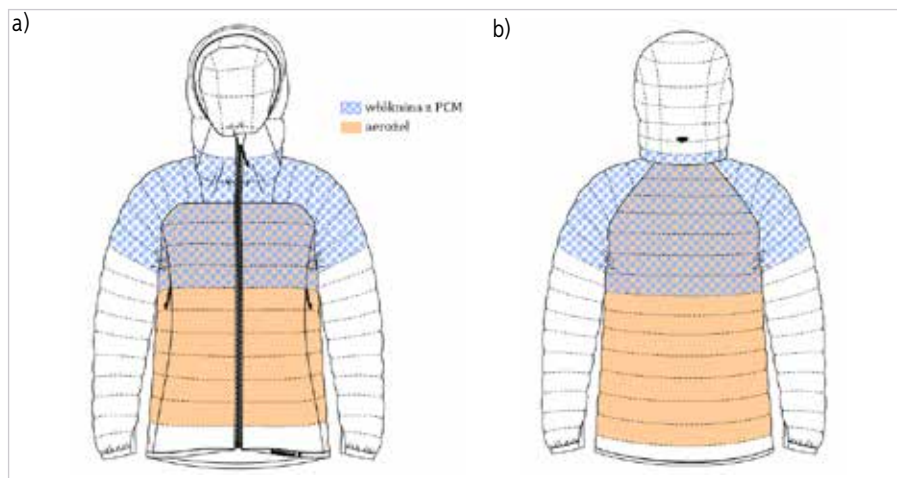
na komfort użytkowania odzieży. Wynika to przede wszystkim z zastosowania nieprzepuszczalnych folii lub membran, które mają uchronić przed przedostawaniem się cząstek aerożelu na zewnątrz i jego pyleniem [18]. Stąd prowadzone są dalsze prace badawcze nad nowymi materiałami tekstylnymi z aerożelem.

Celem artykułu jest zaprezentowanie nowego rodzaju odzieży ciepłochronnej, która wykorzystuje dwa innowacyjne materiały, tj. aerożel i PCM, poprawiające jej walory ergonomiczne oraz zapewniające komfort cieplny w zmienionych warunkach mikroklimatu zimnego lub przy zmiennym obciążeniu fizycznym podczas pracy. Funkcją aerożelu było podwyższenie właściwości ochronnych odzieży (tj. ochrony przed zimnem) bez niekorzystnego zwiększania jej grubości, co ma miejsce w przypadku stosowania standardowych materiałów izolacyjnych, np. włókniny puszystej lub puchu. Zastosowanie PCM miało zapewnić efekt chłodzenia ciała użytkownika m.in. podczas zwiększonego wysiłku fizycznego w środowisku zimnym lub w przypadku wzrostu temperatury otoczenia. Opracowaną odzież oceniano pod względem ciepłochronności oraz efektywności chłodzenia na podstawie wyników badań gęstości strumienia ciepła z manekina termicznego oraz jej izolacyjności cieplnej. Artykuł dotyczy tylko przepływu ciepła przez odzież, nie koncentruje się zaś na problemach związanych z transportem wilgoci przez odzież.

## Materiały i metody badawcze

Badaniom poddano model kurtki puchowej z aerożelem i materiałami przemiany fazowej (PCM), opracowany w Centralnym Instytucie Ochrony Pracy – Państwowym Instytucie Badawczym (CIOP-PIB).

<sup>2</sup> <http://www.cabotcorp.com/solutions/products-plus/aerogel> [dostęp: 19.12.2022 r.]

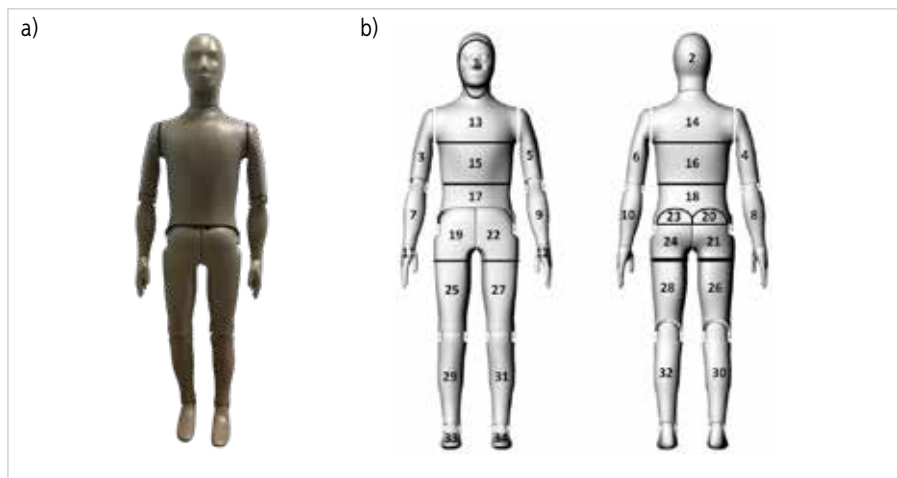


Rys. 1. Rysunek modelowy kurtki puchowej z zaznaczonymi obszarami występowania aerożelu i włókna z PCM: a) przód, b) tył  
Fig. 1. Model drawing of the down jacket with marked areas of aerogel and non-woven fabric with PCM: a) front, b) back

Odzież wykonano z puchoszczelnej tkaniny poliamidowej (100% PA) o masie powierzchniowej 19 g/m<sup>2</sup>. Wypełnienie w kurtce, w zależności od umiejscowienia, stanowiły puch kaczycy (93% puchu, 7% pierza) o sprężystości 850 in<sup>3</sup> lub mieszanka puchu i aerożelu krzemionkowego w proporcjach masowych 1:5. W konstrukcji kurtki zastosowano również cienką włókninę o właściwościach termoregulacyjnych, zawierającą mikropuszkulki z PCM o temperaturze topnienia ok. 27°C.

Charakterystykę użytych materiałów tekstylnych i aerożelu przedstawiono w tab. 1 i 2.

Konstrukcja kurtki bazuje na koncepcji *body mapping*, czyli na tzw. mapowaniu ciała [19]. Zgodnie z tą koncepcją materiał chłodzący z PCM rozmieszczono w miejscach odpowiadających obszarom ciała, w których temperatura skóry osiąga najwyższe wartości podczas intensywnego wysiłku fizycznego, tzn. w stójce, w części okrywającej ramiona, klatkę piersiową i górną część pleców



Nazwa angielska	Nazwa polska	Numer segmentu
R Up Arm Fr	górną, przednią część prawego ramienia	3
L Up Arm Fr	górną, przednią część lewego ramienia	5
R Up Arm Bk	górną, tylną część prawego ramienia	4
L Up Arm Bk	górną, tylną część lewego ramienia	6
Upper Chest	górną część klatki piersiowej	13
Shoulders	ramiona	14
Stomach	brzuch	15
Mid Back	środkową część pleców	16
Waist	talía	17
Lower Back	dolną część pleców	18
R Up Thigh Fr	górną, przednią część prawego uda	19
L Up Thigh Fr	górną, przednią część lewego uda	22
R Up Thigh Bk	górną, tylną część prawego uda	20
L Up Thigh Bk	górną, tylną część lewego uda	23

Rys. 2. Manekin termiczny Newton: a) zdjęcie manekina<sup>3</sup>, b) schemat przodu i tyłu z zaznaczonymi segmentami<sup>4</sup>  
Fig. 2. Newton thermal manikin: a) photography, b) diagram of front and back with marked segments

oraz pod pachami. W obszarach wymagających dogrzania podczas prac statycznych lub niewielkiego wysiłku w środowisku zimnym, tzn. w obszarze okrywającym klatkę piersiową, brzuch i plecy, jako warstwę izolującą zastosowano mieszankę puchu i aerożelu. Widok kurtki z zaznaczonymi obszarami występowania włókna z PCM i aerożelu przedstawiono na rys. 1.

## Aparatura badawcza

Do badań użyto manekina termicznego Newton, zbudowanego z 34 segmentów (rys. 2). Jest on wykonany z miedzi i pokryty węglowo-epoksydową skorupą z wbudowanymi elementami grzejnymi i czujnikami. Każdy z segmentów ma oddzielny system grzewczy, kontrolowany przez indywidualny układ sterowania. Z każdego z tych segmentów uzyskiwana jest informacja o lokalnej wymianie ciepła z otoczeniem w postaci wartości wydzielanego ciepła i temperatury powierzchni segmentu. Manekin ma ruchome stawy łokciowe, ramienne, biodrowe, kolanowe oraz skokowe, które pozwalają na wykonywanie badań w ruchu przy symulacji chodzenia z zadaną prędkością (maksymalnie 55 podwójnych kroków na minutę).

Podczas badań manekin termiczny umieszczony jest w komorze klimatycznej, która umożliwia utrzymanie stałych, kontrolowanych parametrów: temperatury (od -40°C do +70°C), prędkości przepływu powietrza (do 3 m/s) oraz wilgotności względnej (od 10% do 90%).

## Procedura badań

W celu oceny efektywności chłodzenia oraz ciepłochronności opracowanej odzieży badano przebieg zmian gęstości strumienia ciepła ( $H_c$ ) na wybranych segmentach manekina w przypadku dwóch wariantów kurtek puchowych:

- A – kurtki z funkcją termoregulacji, zawierającej aerożel i PCM,
- REF – kurtki referencyjnej (o identycznej konstrukcji, ale bez dodatków).

Temperaturę powierzchni manekina termicznego ustawiono na 34°C, jak podczas badania izolacyjności cieplnej odzieży według PN-EN ISO 15831:2006 [20]. Badania prowadzono na manekinie nieruchomym w komorze klimatycznej, w identycznych, kontrolowanych warunkach (temperatura 19°C, wilgotność względna 55%, prędkość ruchu powietrza 0,4 m/s). Ponieważ celem badań było porównanie modelu kurtki puchowej z aerożelem i PCM z modelem kurtki puchowej o takiej samej konstrukcji, ale bez zastosowania dodatków, warunki badania dobrano tak, aby możliwe było przeprowadzenie badań obu modeli kurtki samodzielnie (tj. bez dodatkowych elementów odzieży – np. bielizny, spodni)

<sup>3</sup> <https://m.ciop.pl/CIOPPortalWAR/file/83991/Manekin-termiczny-M-Mlynarczyk-Z-16.pdf> [dostęp: 20.12.2022 r.].

<sup>4</sup> <https://thermetrics.com/products/manikin/newton-thermal-manikin/> [dostęp: 20.12.2022 r.].

z utrzymaniem gęstości strumienia ciepła  $H_c$  na odpowiednim poziomie i bez powodowania przy tym nadmiernych strat ciepła z segmentów manekina niepokrytych przez odzież. Badania te miały charakter wstępnej oceny zaprojektowanej konstrukcji odzieży, natomiast badania uwzględniające rzeczywiste przewidywane warunki użytkowania zostały uwzględnione w metodyce badawczej projektu na dalszych etapach prac.

Analizie poddano jedynie te segmenty manekina, które pokrywały się z obszarami występowania aerozelu i/lub PCM w kurtce puchowej z funkcją termoregulacji (rys. 2). Dla każdego z tych segmentów wyznaczono wartości lokalnej izolacyjności cieplnej. Ponadto w celu całościowego porównania obu wariantów kurtek obliczono efektywną izolacyjność cieplną  $I_{cle}$  każdej z nich, korzystając ze wzoru [20]:

$$I_{cle} = I_t - I_a \quad [m^2 \cdot K/W]$$

gdzie:

$I_t$  – całkowita izolacyjność cieplna odzieży [ $m^2 \cdot K/W$ ],

$I_a$  – całkowita izolacyjność cieplna granicznej warstwy powietrza przy powierzchni skóry dla nagiego, nieruchomego manekina [ $m^2 \cdot K/W$ ].

Całkowitą izolacyjność cieplną odzieży wyznaczono ze wzoru [20]:

$$I_t = \frac{(T_s - T_a) \cdot A}{H} \quad [m^2 \cdot K/W]$$

gdzie:

$T_s$  – średnia temperatura powierzchni powłoki manekina [ $^{\circ}C$ ],

$T_a$  – temperatura powietrza w komorze klimatycznej [ $^{\circ}C$ ],

$A$  – całkowite pole powierzchni manekina [ $m^2$ ],  
 $H$  – całkowita moc grzejna dostarczana do manekina [ $W$ ].

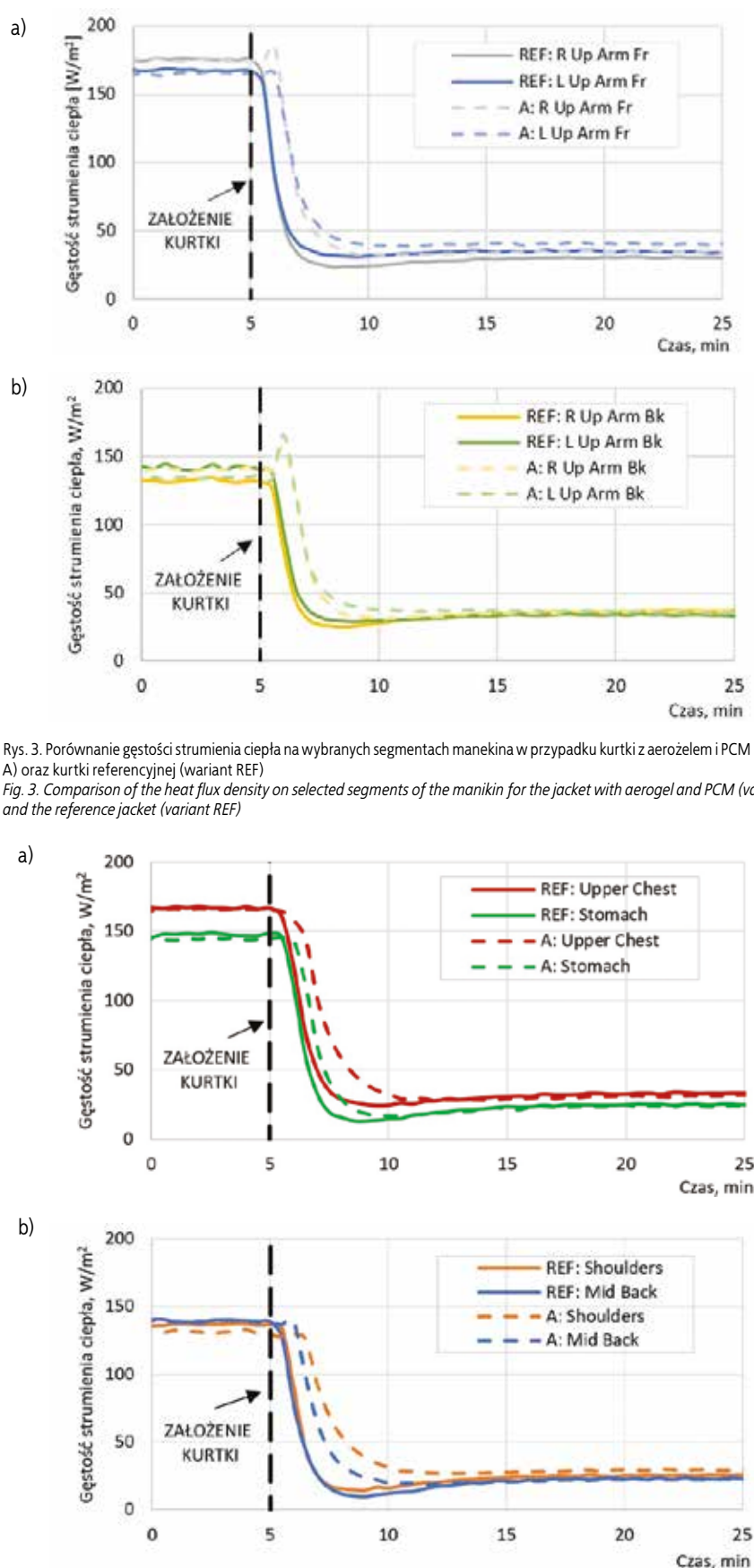
Przed przystąpieniem do badań odzież aklimatyzowano przez minimum 24 godziny w pomieszczeniu laboratoryjnym w temperaturze ok.  $19^{\circ}C$ , tzn. poniżej temperatury topnienia PCM zawartych we włókninie. Wartość temperatury w laboratorium kontrolowano, by nie dopuścić do aktywacji i stopienia PCM.

## Wyniki badań

### Gęstość strumienia ciepła

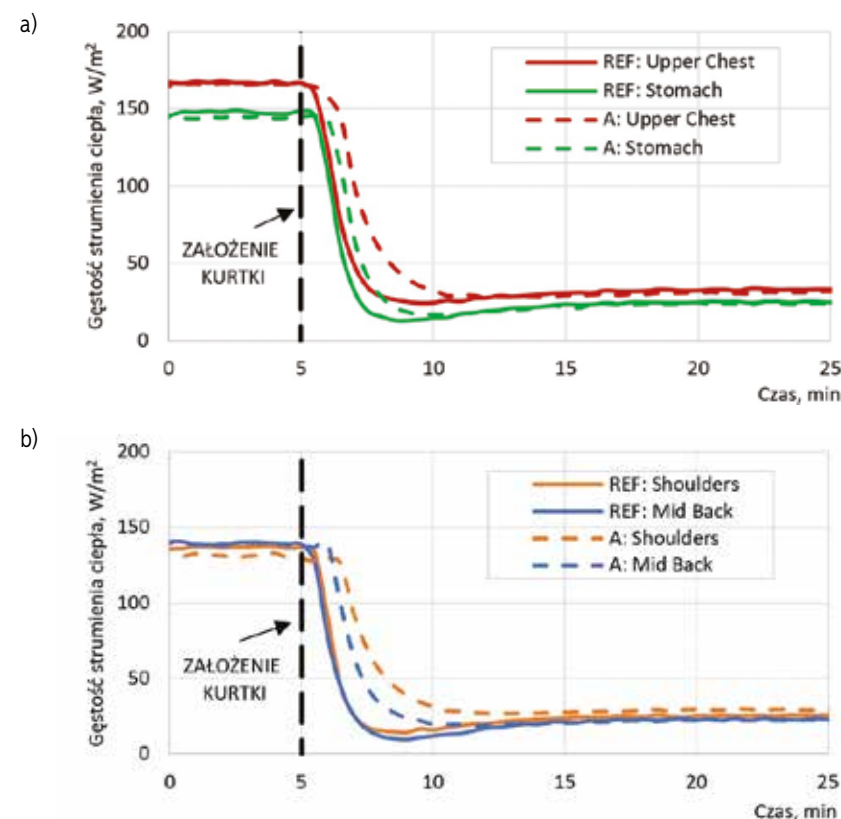
Wyniki badań gęstości strumienia ciepła z poszczególnych segmentów manekina podczas testowania kurtki z funkcją termoregulacji oraz kurtki referencyjnej zestawiono na wykresach (rys. 3-5).

Po założeniu kurtki referencyjnej (REF) zarejestrowano spadek gęstości strumienia ciepła z segmentów manekina, co wynikało z mniejszego



Rys. 3. Porównanie gęstości strumienia ciepła na wybranych segmentach manekina w przypadku kurtki z aerozelem i PCM (wariant A) oraz kurtki referencyjnej (wariant REF)

Fig. 3. Comparison of the heat flux density on selected segments of the manikin for the jacket with aerogel and PCM (variant A) and the reference jacket (variant REF)



Rys. 4. Porównanie gęstości strumienia ciepła na wybranych segmentach manekina w przypadku kurtki z aerozelem i PCM (wariant A) oraz kurtki referencyjnej (wariant REF)

Fig. 4. Comparison of the heat flux density on selected segments of the manikin for the jacket with aerogel and PCM (variant A) and the reference jacket (variant REF)

zapotrzebowania na moc grzejącą dostarczaną do manekina w celu utrzymania jego stałej temperatury, tj. 34°C. Z kolei w przypadku kurtki z funkcją termoregulacji (A) bezpośrednio po jej założeniu zauważono wyraźny wzrost gęstości strumienia ciepła w porównaniu z kurtką referencyjną, zwłaszcza na segmentach „Up Arm Bk” (o ok. 20-23 W/m<sup>2</sup>). Wyniki te świadczą o intensywnym efekcie chłodzenia tych segmentów manekina przez PCM, ale tylko przez ok. 5-10 minut. Po tym czasie gęstość strumienia ciepła dla obu wariantów kurtek osiągnęła zbliżoną wartość (rys. 3b). Na przednich częściach ramion (rys. 3a) efekt chłodzenia był mniej intensywny, ale utrzymywał się przez cały okres badania, tzn. przez 20 minut. Po ustabilizowaniu się gęstość strumienia ciepła na tych segmentach dla kurtki z funkcją termoregulacji była tylko o ok. 7 W/m<sup>2</sup> wyższa niż w przypadku kurtki referencyjnej.

Uzyskane wyniki świadczą o tym, że wpływ na efektywność chłodzenia organizmu w dużej mierze ma stopień dopasowania odzieży do sylwetki. Wyższa wartość gęstości strumienia ciepła na segmentach „Up Arm Bk” była spowodowana prawdopodobnie lepszym przyleganiem kurtki w tych obszarach i tym samym mniejszą odległością materiału chłodzącego z PCM od powierzchni manekina.

Analizując wartości gęstości strumienia ciepła zmierzone na segmentach „Upper Chest”, „Stomach” i „Mid Back”, można zauważyć, że podczas testowania kurtki z funkcją termoregulacji A wartość tego parametru była wyższa niż w kurtce referencyjnej REF przez ok. 6-8 minut od momentu założenia (rys. 4). Po tym czasie ustabilizowała się i w przypadku obu wariantów kurtek utrzymywała się na zbliżonym poziomie. Wyniki te potwierdzają chłodzące działanie PCM w kurtce A, jednak tylko w początkowej fazie badania. Po wskazanym czasie PCM uległy stopniowi, tracąc tymczasowo swoje właściwości chłodzące. Przywrócenie tych właściwości możliwe było dopiero po ponownym schłodzeniu odzieży (w temperaturze poniżej temperatury krystalizacji PCM). W przypadku segmentu „Shoulders” efekt chłodzenia utrzymywał się przez cały okres badania, o czym świadczy wyższa wartość gęstości strumienia ciepła niż w odzieży referencyjnej. Należy jednak zaznaczyć, że okres najbardziej intensywnego chłodzenia przypada na pierwsze 8 minut od założenia odzieży na manekina. Po tym czasie gęstość strumienia ciepła ustabilizowała się i była tylko o ok. 4 W/m<sup>2</sup> wyższa niż podczas badania odzieży referencyjnej.

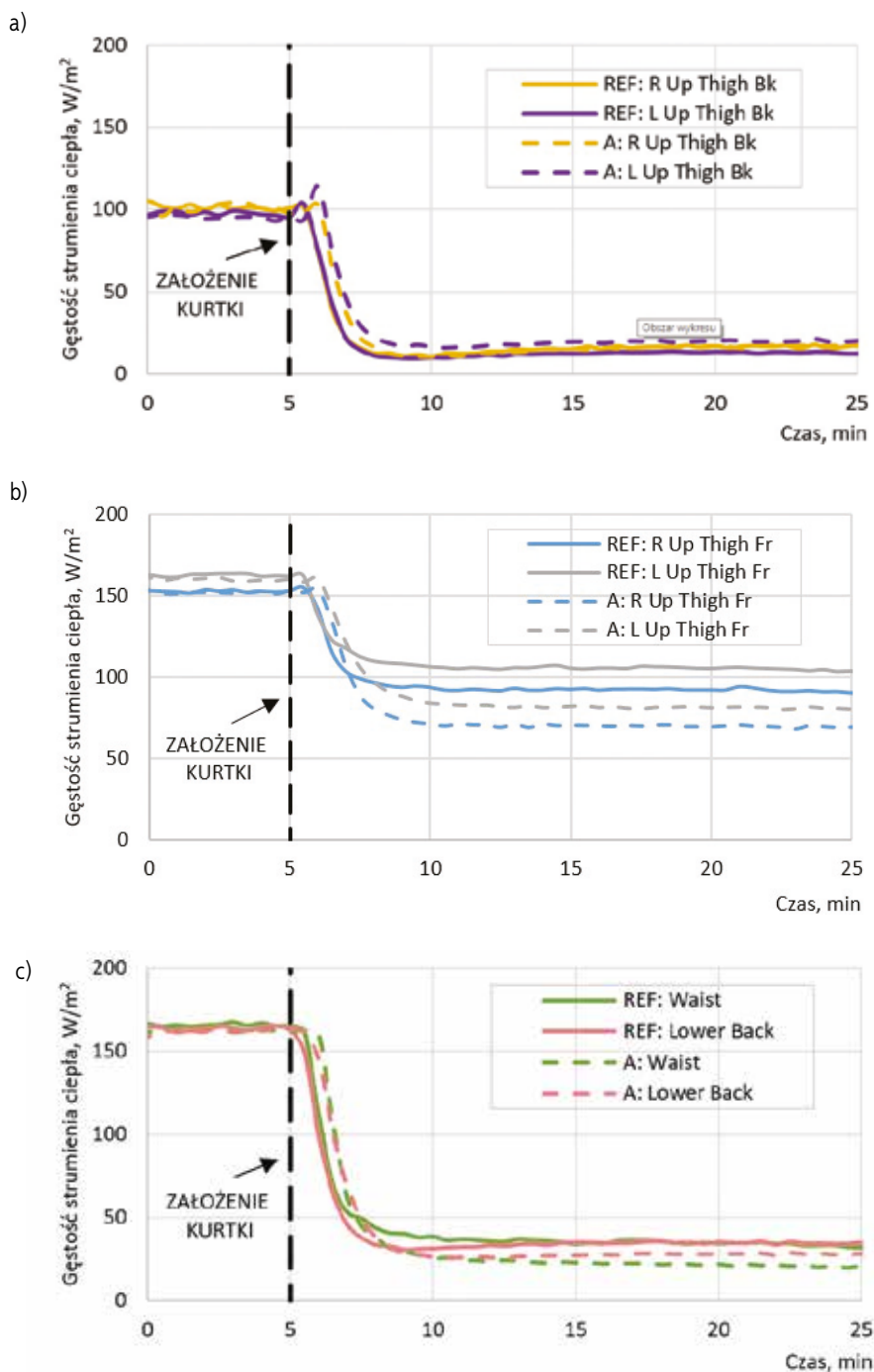
Na wykresach dotyczących analizowanych segmentów (rys. 4) bezpośrednio po założeniu kurtki z funkcją termoregulacji (A) nie zarejestrowano charakterystycznych pików jak dla segmentów ramieniowych (rys. 3). Efekt chłodzenia uzyskany przez PCM został częściowo złagodzony przez obecność w kurtce dodatkowej warstwy w postaci wysokoizolacyjnego aerozolu.

Przebieg gęstości strumienia ciepła na segmentach „Up Thigh Bk” w przypadku odzieży

z funkcją termoregulacji (A) był bardzo zbliżony jak w przypadku odzieży referencyjnej (REF), zwłaszcza na prawym segmencie (rys. 5a). Wynikało to z faktu, że powierzchnia tych segmentów była w większości pokryta przez obszary kurtki wypełnione samym puchem bez dodatków, a powierzchnia zajmowana przez wypełnienie z aerozelem była niewielka. W przypadku lewego segmentu wartość gęstości strumienia ciepła po ustabilizowaniu się dla kurtki z funkcją termoregulacji utrzymywała się na poziomie wyższym o ok. 5 W/m<sup>2</sup> w porównaniu z odzieżą referencyj-

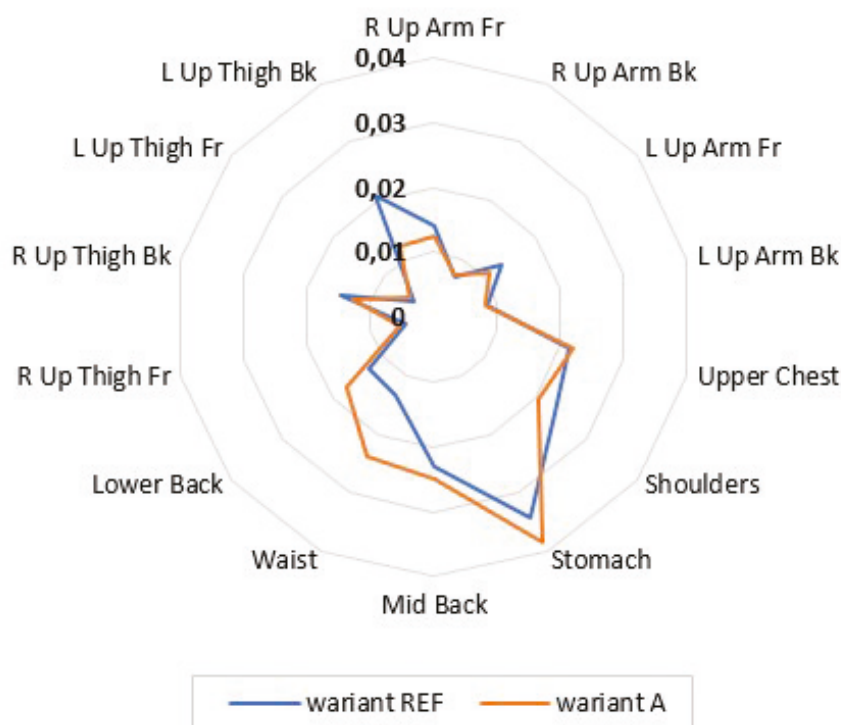
ną. Było to spowodowane prawdopodobnie zbyt ścisłym jej przyleganiem do segmentu manekina lub przesunięciem się wypełnienia i wystąpieniem luki, która ułatwiała napływ chłodnego powietrza do manekina.

Na segmentach „Up Thigh Fr” gęstość strumienia ciepła po stabilizacji była niższa dla oprawianego modelu odzieży (A) o ok. 25 W/m<sup>2</sup> względem odzieży referencyjnej (rys. 5b). Podobnie niższe wartości gęstości strumienia ciepła w warunkach równowagi uzyskano na segmentach „Lower Back” i „Waist” (rys. 5c).



Rys. 5. Porównanie gęstości strumienia ciepła na wybranych segmentach manekina w przypadku kurtki z aerozelem i PCM (wariant A) oraz kurtki referencyjnej (wariant REF)

Fig. 5. Comparison of the heat flux density on selected segments of the manikin for the jacket with aerogel and PCM (variant A) and the reference jacket (variant REF)



Rys. 6. Wyniki badań lokalnej izolacyjności cieplnej (tj. na poszczególnych segmentach manekina) w przypadku odzieży z aerozelem i PCM (A) oraz odzieży referencyjnej (REF)  
 Fig. 6. Results of tests of local thermal insulation (i.e. on individual segments of the manikin) for clothing with aerogel and PCM (A) and reference clothing (REF)

Wynikało to z obecności aerożelu w tych obszarach (bez jednoczesnej obecności włókny z PCM), który dzięki swoim właściwościom izolacyjnym ograniczał przenikanie zimnego powietrza do manekina.

### Izolacyjność cieplna odzieży

Wyniki badań lokalnej izolacyjności cieplnej modelu kurtki z aerozelem i PCM (A) oraz kurtki referencyjnej (REF) na poszczególnych segmentach manekina termicznego przedstawiono na rys. 6.

Wyznaczona dla kurtki referencyjnej efektywna izolacyjność cieplna  $I_{cl}$  wyniosła 0,052 m<sup>2</sup>K/W, natomiast dla opracowanego modelu kurtki zawierającej dodatkowo aerożel i PCM wzrosła tylko o ok. 7,7 %, tj. do wartości 0,056 m<sup>2</sup>K/W. Uzyskane wartości są do siebie bardzo zbliżone i nie wskazują na znaczącą poprawę izolacyjności opracowanego modelu odzieży. Jednakże analizując wartości lokalnej izolacyjności cieplnej (rys. 6), można zaobserwować, że kurtka ta wykazuje dużo wyższą izolacyjność na wybranych segmentach, zwłaszcza na segmentach „Lower Back” (wzrost o 35%) i „Waist” (wzrost aż o 78%). Taka zależność spowodowana jest występowaniem w modelu odzieży na całej powierzchni tych obszarów dodatku w postaci samego aerożelu (bez PCM), który jako bardzo dobry materiał izolacyjny może skutecznie zwiększać poziom ochrony przed zimnem. W obszarach, gdzie aerożel występo-

wał w połączeniu z PCM, tzn. na segmentach „Stomach” i „Mid Back”, wzrost izolacyjności był znacznie mniejszy. Powodem tego mogła być nieco większa sztywność włókny z PCM w porównaniu z samą tkaniną zewnętrzną, co skutkowało ograniczoną możliwością rozprężania się puchu.

Z kolei widoczne pogorszenie izolacyjności kurtki z aerozelem i PCM w odniesieniu do kurtki referencyjnej na segmentach „Shoulders” i „L Up Thigh Bk” oraz w mniejszym stopniu na segmentach „Up Arm” wynikało prawdopodobnie ze zbyt ścisłego jej przylegania do powierzchni manekina, tzn. zastosowania zbyt małych luzów. W celu poprawy izolacyjności kurtki konieczne jest skorygowanie jej konstrukcji w tych obszarach.

### Podsumowanie

Do pracy w środowisku zimnym, przy wykonywaniu różnych czynności o zmiennym wydatku energetycznym, potrzebna jest lekka, ergonomiczna odzież, samoczynnie dostosowująca swoje właściwości ochronne do zmiennych warunków klimatycznych i intensywności wykonywanej pracy. W artykule przedstawiono nowy typ odzieży ciepłochronnej, tj. z dodatkiem aerożelu i włókny z materiałami przemiany fazowej (PCM). Aerożel zastosowano w celu podwyższenia właściwości ochronnych odzieży (tj. izolacyjności cieplnej) bez niekorzystnego zwiększania jej grubości. Zastoso-

wanie PCM miało zapewnić efekt chłodzenia ciała pracownika m.in. podczas zwiększonego wysiłku fizycznego lub w przypadku wzrostu temperatury otoczenia.

Na podstawie badań opracowanego modelu kurtki puchowej z dodatkiem aerożelu i PCM, przeprowadzonych na manekinie termicznej, potwierdzono, że zastosowana włókna z PCM zapewnia efekt chłodzenia, o czym świadczy zwiększenie gęstości strumienia ciepła z manekina w miejscach jej występowania. Efekt ten jest jednak krótkotrwały, gdyż w większości obszarów kurtki nie utrzymuje się dłużej niż 5-10 minut. Opracowana odzież może zatem stanowić tylko tymczasowe, kilkuminutowe rozwiązanie ograniczające obciążenie cieplne podczas pracy w środowisku zimnym, tzn. do momentu stopienia PCM. Przywrócenie odzieży właściwości chłodzących będzie wymagało jej ponownego schłodzenia.

Zastosowanie w kurtce aerożelu nie spowodowało znaczącej poprawy jej efektywnej izolacyjności cieplnej w stosunku do odzieży referencyjnej, jednak przyczyniło się do podwyższenia lokalnych wartości izolacyjności cieplnych, zwłaszcza w obszarach kurtki zawierających samą mieszkankę puchowo-aerożelową, tzn. na segmencie „Lower Back” (wzrost o 35%) i „Waist” (wzrost o 78%). Korzystny wpływ aerożelu na ciepłochronność wybranych obszarów kurtki potwierdziły również wyniki badań gęstości strumienia ciepła – jego wartości po ustabilizowaniu się były niższe w porównaniu z odzieżą referencyjną nawet o 25 W/m<sup>2</sup>.

Jednoczesna obecność aerożelu i włókny z PCM w kurtce na segmentach „Stomach” i „Mid Back” również przyniosła wymierne efekty w postaci kilkuminutowego efektu chłodzenia (bezpośrednio po założeniu kurtki) oraz niewielkiej poprawy lokalnej izolacyjności cieplnej (w stanie równowagi).

W niektórych obszarach opracowanego modelu kurtki, mimo zastosowania dodatkowej warstwy w postaci włókny z PCM lub aerożelu, odnotowano pogorszenie lokalnej izolacyjności cieplnej. Wynikało to prawdopodobnie z zastosowania zbyt małych luzów w tych obszarach. W celu poprawy poziomu ciepłochronności odzieży konieczne jest zweryfikowanie konstrukcji kurtki, zwłaszcza w obszarach „Shoulders”, „Up Arm Fr” i „Up Thigh Bk” pod kątem zwiększenia przestrzeni powietrznych między ciałem użytkownika a odzieżą.

W rzeczywistych warunkach użytkowania kurtki przez ludzi aktywacja PCM powinna nastąpić przy odpowiednio wysokiej temperaturze otoczenia (tak jak podczas omawianych tu badań z wykorzystaniem manekina termicznego) lub przy wzroście temperatury skóry użytkownika na skutek zwiększonego wysiłku fizycznego. Niestety ten drugi przypadek nie był możliwy do zasymulowania w badaniach na manekinie termicznym. W celu kompleksowej oceny opracowanej odzieży zaplanowano dalsze badania z udziałem ludzi.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] ZWOLIŃSKA M., BOGDAN A. Związki zmienno-fazowe w zastosowaniach techniczno-użytkowych i ergonomicznych. *Bezpieczeństwo Pracy. Nauka i Praktyka*. 2012, 4: 22-25.
- [2] MONDAL S. Phase change materials for smart textiles – an overview. *Applied Thermal Engineering*. 2008, 28(11-12): 1536-1550.
- [3] MŁYNARCZYK M., BARTKOWIAK G., DĄBROWSKA A. Cooling Effect of Phase Change Materials Applied in Undergarments of Mine Rescuers in Simulated Utility Conditions on Thermal Manikin. *Materials*. 2022,15: 1999.
- [4] BENDKOWSKA W. i in. Thermal Manikin Evaluation of PCM Cooling Vests. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*. 2010, 18, 1(78): 70-74.
- [5] TJØNNÅS M.S. i in. The dry-heat loss effect of melt-spun phase change material fibres. *Ergonomics*. 2015, 58(3): 535-542.
- [6] DORMAN L., HAVENITH G. The effects of protective clothing on energy consumption during different activities. *European Journal of Applied Physiology*. 2009, 105(3): 463-470.
- [7] FAERVIK H., WIGGEN O. Clothing and protection in arctic environments. [W:] *Proceedings of the Ambience'14 & 10i3m*, 7-9 September 2014, Tampere (Finland), [https://www.academia.edu/17396499/CLOTHING\\_AND\\_PROTECTION\\_IN\\_ARCTIC\\_ENVIRONMENTS](https://www.academia.edu/17396499/CLOTHING_AND_PROTECTION_IN_ARCTIC_ENVIRONMENTS).
- [8] AEGERTER M.A., LEVENTIS N., KOEBEL M.M. *Aerogels Handbook. Advances in Sol-Gel Derived Materials and Technologies*. New York: Springer, 2011.
- [9] NORRIS P.M., SHRINIVASAN S. Aerogel: unique material, fascinating properties and unlimited applications. *Annual Review of Heat Transfer*. 2005, 14: 394-395.
- [10] KŘEMENÁKOVÁ D. i in. Chapter 20. Thermal Insulation and Porosity – From Macro to Nanoscale. [W:] J. Šesták, P. Hubík, J.J. Mareš (red.), *Thermal Physics and Thermal Analysis*. Cham: Springer International Publishing, 2017, s. 425-448.
- [11] NUCKOLS M.L. i in. Design and Evaluation of Cold Water Diving Garments Using Super-insulating Aerogel Fabrics. [W:] N.W. Pollock (red.), *Proceedings of the American Academy of Underwater Sciences 28th Symposium*, AAUS, Dauphin Island, AL, 2009, <https://semspub.epa.gov/work/10/100006143.pdf>.
- [12] HÖFFELE S., RUSSELL S.J., BROOK D.B. Light-Weight Nonwoven Thermal Protection Fabrics containing Nanostructured Materials. *International Nonwovens Journal*. 2005, 14(4): 10-16.
- [13] XIONG X. i in. Thermal and compression characteristics of aerogel-encapsulated textiles. *Journal of Industrial Textiles*. 2017, 47(8): 1998-2013.
- [14] VENKATARAMAN M., MISHRA R., MILITKY J. Electrospun nanofibrous membranes embedded with aerogel for advanced thermal and transport properties. *Polymers for Advanced Technologies*. 2018, 29(10): 2583-2592.
- [15] ISLAM S.R., YU W., NAVEED T. Influence of silica aerogels on fabric structural feature for thermal isolation properties of weft-knitted spacer fabrics. *Smart and Interactive Textile Materials*. 2019, 14: 1-11.
- [16] BHUIYAN M.A.R. i in. Silica aerogel-integrated nonwoven protective fabrics for chemical and thermal protection and thermophysiological wear comfort. *Journal of Materials Science*. 2020, 5(6): 2405-2418.
- [17] GRESZTA A. i in. Multilayer Nonwoven Inserts with Aerogel/PCMs for the Improvement of Thermophysiological Comfort in Protective Clothing against the Cold. *Materials*. 2022, 15(6): 2307.
- [18] DU Y., KIM H.E. A market research on the development trends of aerogel daily clothing. *Fashion & Textile Research Journal*. 2019, 21(1): 96-103.
- [19] FOURNET D. i in. Body mapping of thermoregulatory and perceptual responses of males and females running in the cold. *Journal of Thermal Biology*. 2013, 38(6): 339-344.
- [20] PN-EN ISO 15831:2006. *Odzież – Właściwości fizjologiczne – Pomiar izolacyjności cieplnej z zastosowaniem manekina termicznego*.

*Opracowano i wydano na podstawie wyników V etapu programu wieloletniego pn. „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w zakresie badań naukowych i prac rozwojowych ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju (projekt nr III.PB.08 pt. „Opracowanie inteligentnej odzieży ciepłochronnej z synergicznym działaniem pasywnych i aktywnych materiałów o właściwościach termoregulacyjnych dla osób pracujących w warunkach mikroklimatu zimnego”). Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.*

## POLECAMY KWARTALNIK

# Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy

**W najnowszym numerze  
m.in. artykuły dotyczące:**

- niklu i jego związków – substancji rakotwórczych i reprotoksycznych,
- oceny wpływu nanocząstek platyny na steroidogenezę,
- oznaczania izoprenu w powietrzu.

