

Agnieszka Greszta
Anna Dąbrowska

INTELIĞENTNA ODZIEŻ CIEPŁOCHRONNA WSPOMAGAJĄCA TERMOREGULACJĘ UŻYTKOWNIKA

Materiały informacyjne



Materiały informacyjne opracowano na podstawie wyników V etapu programu wieloletniego „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w latach 2020-2022 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”.

Koordinator Programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.

Autorki: mgr inż. Agnieszka Greszta, dr inż. Anna Dąbrowska
Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

© Copyright by Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy
Warszawa 2022

CIOP  **PIB**

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Czerniakowska 16, 00-701 Warszawa
tel. (48-22) 623 36 98, www.ciop.pl

Wprowadzenie

Podczas wykonywania prac w środowisku zimnym bardzo ważne jest zapewnienie odzieży ciepłochronnej o odpowiedniej izolacyjności cieplnej. Nie jest to proste zadanie, szczególnie na stanowiskach, gdzie osoby narażone są na duże zmiany temperatur w krótkich przedziałach czasowych lub wykonują prace o różnym obciążeniu. Częstym problemem jest też zbyt duża masa i grubość odzieży, co w mniejszym lub większym stopniu powoduje ograniczenia ruchowe i zwiększa obciążenie pracą.

W celu poprawy komfortu osób pracujących w takich warunkach, w CIOP-PIB opracowano nowe rozwiązanie w postaci inteligentnej odzieży ciepłochronnej z funkcją termoregulacji. Odzież ta łączy w sobie zalety ultralekkich aerożeli, które uznawane są za najlepszy rodzaj izolacji cieplnej oraz materiałów przemiany fazowej (PCM), zapewniających przyjemny efekt chłodzenia przy zwiększonym wysiłku fizycznym.

Obciążenie cieplne pracowników w środowisku zimnym

Mikroklimat zimny stwarza zagrożenie dla pracowników na skutek oddziaływania takich czynników jak: niska temperatura powietrza, zmiana ruchu powietrza (prędkości wiatru) i wysoka wilgotność. Przebywanie przez dłuższy czas w środowisku zimnym może powodować zwiększone straty ciepła z organizmu do otoczenia, a w konsekwencji dyskomfort cieplny lub nawet wychłodzenie organizmu.

Wzmozżona utrata ciepła z organizmu podczas ekspozycji na niską temperaturę może być spowodowana też obniżeniem tempa metabolizmu (np. na skutek wykonywania mniej intensywnych prac), lub zwiększeniem prędkości przepływu chłodnego powietrza.

Człowiek ze względu na to, że jest organizmem stałocieplnym, dąży do utrzymania temperatury wewnętrznej ciała na stałym poziomie, wynoszącym $(37,0 \pm 0,3)$ °C (Grether, 1973). Utrzymanie stałej (w granicach odchyłeń) temperatury wewnętrznej ciała możliwe jest dzięki mechanizmom termoregulacyjnym organizmu (Bogdan i inni, 2012; Angelova, 2017). W przypadku narażenia na działanie niskich temperatur organizm broni się przed utratą ciepła, m.in. poprzez skurcz naczyń krwionośnych skóry, który powoduje zmniejszenie przepływu krwi. Dzięki temu obniża się temperatura skóry i ograniczone zostają straty ciepła z jej powierzchni do otoczenia (Marszałek, 2009; Łastowiecka-Moras, 2014). Jednocześnie organizm zwiększa też produkcję ciepła, aby móc utrzymać równowagę cieplną. Uruchomienie mechanizmów zachowania i produkcji ciepła stanowi dodatkowe obciążenie dla organizmu.

Skuteczność mechanizmów termoregulacyjnych człowieka jest ograniczona. W przypadku długotrwałego narażenia na oddziaływanie środowiska zimnego, szczególnie o dużym nasileniu może dojść do niebezpiecznego obniżenia temperatury wewnętrznej i wychłodzenia organizmu, czyli hipotermii. W wyniku wystąpienia hipotermii może nastąpić pogorszenie funkcjonowania mięśni i ośrodkowego układu nerwowego, w tym pogorszenia zdolności do wykonywania pracy fizycznej i umysłowej, a w najgorszym przypadku nawet zgon.

Stąd, aby zapobiec nadmiernym stratom ciepła z organizmu człowieka do otoczenia, konieczne jest stosowanie odpowiednio dobranej odzieży ciepłochronnej. Zaleca się, aby stosować odzież ciepłochronną o optymalnej, a nie maksymalnej izolacyjności cieplnej (Havenith, 1999; Marszałek i Bartkowiak, 2013).

W przypadku odzieży ciepłochronnej o zbyt niskiej izolacyjności, ciepło generowane przez organizm człowieka nie jest w stanie zrównoważyć nadmiernych strat ciepła do otoczenia i pracownik zaczyna odczuwać dyskomfort cieplny. Skutkiem tego jest pogorszenie jakości wykonywanych czynności zawodowych oraz obniżenie efektywności pracy (Sudoł - Szopińska i Łuczak, 2006). W skrajnych przypadkach może dojść nawet do lokalnych odmrożeń lub ogólnego wychłodzenia organizmu i zaburzeń w jego funkcjonowaniu (Koradecka, 2008; Marszałek, 2009). Z kolei zbyt wysoka izolacyjność cieplna odzieży może prowadzić do przegrzania organizmu, zwłaszcza przy wykonywaniu prac o zwiększonej intensywności. Następuje wówczas wydzielanie potu i w efekcie zawilgocenie warstw odzieży, co sprzyja powstawaniu odczucia zimna i dyskomfortu (Marszałek, Bartkowiak & Dąbrowska, 2018).

Dobranie właściwej odzieży ciepłochronnej do pracy w zimnym środowisku nie jest więc sprawą łatwą, biorąc pod uwagę chociażby to, że w ciągu zmiany roboczej pracownik może wykonywać prace o zmiennej intensywności, często następuje także zmiana samego środowiska termicznego. Rozwiązaniem problemu mogłaby być odzież ciepłochronna o regulowanej izolacyjności cieplnej.

Problemy związane z użytkowaniem odzieży ciepłochronnej

Z użytkowaniem odzieży ciepłochronnej często wiąże się wiele problemów. Należy tu wymienić m.in. ograniczenie swobody ruchów użytkownika na skutek zastosowania grubych, ciężkich, wielowarstwowych układów materiałów w odzieży (Marszałek i Bartkowiak, 2013). Konsekwencją takiej struktury odzieży, a szczególnie jej zbyt dużej masy, jest zwiększony wydatek energetyczny pracowników podczas wykonywania czynności zawodowych (Mäkinen & Jussila, 2014). Ponadto, często występuje też problem z zapewnieniem komfortu cieplnego, szczególnie w przypadku pracowników narażonych na częste i duże zmiany środowiska termicznego lub wykonujących różne prace o zmiennym obciążeniu fizycznym w mikroklimacie zimnym. Przy intensywnym wysiłku odzież ulega zawilgoceniu potem, co powoduje obniżenie jej izolacyjności cieplnej, a tym samym zmniejszenie ochrony przed zimnem (Marszałek, Bartkowiak & Dąbrowska, 2018). Istotnym problemem jest również zbijanie się włókniyny i spadek izolacyjności cieplnej odzieży po wielokrotnym praniu (Mäkinen et al., 1984, Dąbrowska, 2016).

W celu wyeliminowania ww. problemów lub przynajmniej ich ograniczenia, w CIOP-PIB podjęto się opracowania lekkiej i cienkiej odzieży ciepłochronnej z funkcją termoregulacji, wykorzystującej aerożel i materiały przemiany fazowej. Opracowane rozwiązanie ma formę dwustronnej ocieplanej kamizelki.

Innowacyjna dwustronna kamizelka ciepłochronna z funkcją termoregulacji

Idea przedstawionej kamizelki ciepłochronnej polega na zastosowaniu materiałów przemiany fazowej (tzw. PCM) w miejscach, gdzie organizm człowieka wydziela największe ilości ciepła podczas intensywnego wysiłku oraz na opcjonalnym zastosowaniu lekkich cząstek aerożelu w miejscach narażonych na duże straty ciepła podczas przebywania w mikroklimacie zimnym.

Przeznaczenie odzieży

Kamizelka przeznaczona jest dla osób pracujących w warunkach mikroklimatu zimnego, do stosowania pod odzież wierzchnią. Dedykowana jest w szczególności dla pracowników narażonych na częste zmiany środowiska termicznego i/ lub wykonujących prace o zmiennym obciążeniu fizycznym, np. ratownicy górscy, alpinści i taternicy, instruktorzy narciarstwa i snowboard'u, pracownicy budowlani, monterzy urządzeń telekomunikacyjnych, pracownicy chłodni i mroźni, pracownicy transportu itp.

Funkcje materiałów przemiany fazowej (PCM) i aerożelu w odzieży

W kamizelce ciepłochronnej zastosowano dwa innowacyjne materiały:

- włókninę z mikrokapsułkami PCM (rys. 1) oraz
- opcjonalnie aerożel krzemionkowy w formie lekkiego, drobnego granulatu (rys. 2).

Materiały przemiany fazowej (z ang. *phase change materials*, PCM) to wyjątkowe materiały, które mają zdolność absorbowania, magazynowania oraz uwalniania dużej ilości energii cieplnej w ściśle określonym zakresie temperatury, nazywanym temperaturą przemiany fazowej (Zwolińska i Bogdan, 2012). Podczas tych procesów PCM zmieniają swój stan skupienia (np. ze stałego w ciekły i odwrotnie).

Materiały zawierające PCM doskonale nadają się na materiały chłodzące do odzieży. Podczas wysiłku lub znacznego wzrostu temperatury otoczenia, gdy dochodzi do akumulacji ciepła w organizmie i zwiększenia temperatury skóry użytkownika odzieży, PCM-y zastosowane w odzieży zaczynają się topić, odbierając przy tym nadmiar ciepła wydzielanego przez organizm. PCM mogą też dawać efekt odwrotny, tzn. efekt ogrzewania, dzięki zdolności uwalniania ciepła po osiągnięciu swojej temperatury krystalizacji (Ramesh Babu and Arunraj, 2018).

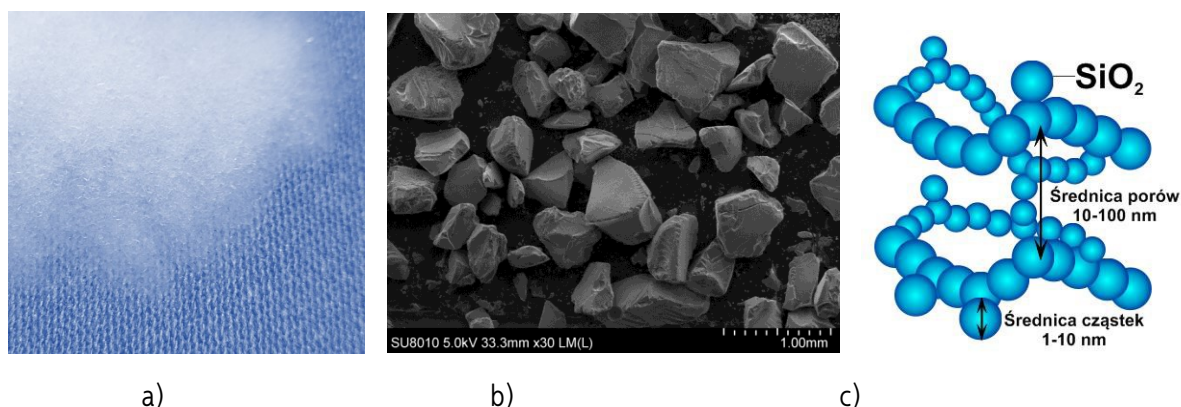
Zadaniem włókniny z mikrokapsułkami PCM, zastosowanej w kamizelce, jest regulowanie temperatury w mikroklimacie pododzieżowym, a w szczególności odbieranie nadmiaru ciepła z ciała człowieka przy intensywnym wysiłku i w ten sposób ograniczenie obciążenia cieplnego podczas pracy w środowisku zimnym. Zastosowana włóknina to komercyjnie dostępna, cienka włóknina poliestrowa (ok. 0,5 mm) z powłoczeniem akrylowym z dodatkiem mikrokapsułek PCM o temperaturze przemiany fazowej ok. 27 °C. Powłoczenie naniesione jest na włókninę w formie regularnego wzoru kropkowego. Włóknina ta charakteryzuje się masą powierzchniową 160 g/m².



Rys. 1. Fotografia włókniny z mikrokapsułkami PCM zastosowanej w kamizelce ciepłochronnej (*foto. źródło własne*)

Aerożel krzemionkowy w opracowanej odzieży pełni funkcję lekkiego materiału termoizolacyjnego. Ma on formę drobnego granulatu o wielkości cząstek 0,1 – 0,7 mm i charakteryzuje się wysokoporowatą strukturą przypominającą gąbkę (rys. 2). Składa się w ponad 90% z powietrza (Aegerter et al., 2011).

Fenomen aerożelu polega na tym, że jest on najlżejszym ciałem stałym na Ziemi i jednocześnie najlepszym znanym izolatorem cieplnym (Křemenáková D. et al., 2017). Gęstość zastosowanego tu aerożelu wynosi tylko ok. 120-150 kg/m³, a jego przewodność cieplna zaledwie 0,012 W/m·K (w temp. 25 °C). Przepływ ciepła przez aerożel ogranicza jego unikalna, bardzo rozbudowana, mikroporowata struktura (rys. 2c) (Norris et al., 2005). Dzięki takiej budowie aerożele wykazują istotnie lepsze właściwości termoizolacyjne od innych obecnie stosowanych materiałów izolacyjnych, a nawet lepsze od nieruchomego powietrza (Křemenáková D. et al., 2017). Zaletą użytego w kamizelce aerożelu krzemionkowego jest również jego hydrofobowość, dzięki czemu zachowuje swoje właściwości termoizolacyjne nawet w środowisku wilgotnym, co często trudne jest do uzyskania w przypadku materiałów ocieplających obecnie stosowanych w odzieży.



Rys. 2. Aerożel krzemionkowy zastosowany w kamizelce ciepłochronnej: a) fotografia, b) mikrofotografia SEM, c) schemat mikrostruktury (fot. źródło własne)

Głównym celem wprowadzenia aerożelu w strukturę kamizelki było zwiększenie jej odporności na przenikanie zimnego powietrza i ograniczenie strat ciepła z organizmu człowieka do otoczenia w warunkach mikroklimatu zimnego, ale bez istotnego zwiększenia masy i grubości kamizelki.

Konstrukcja odzieży

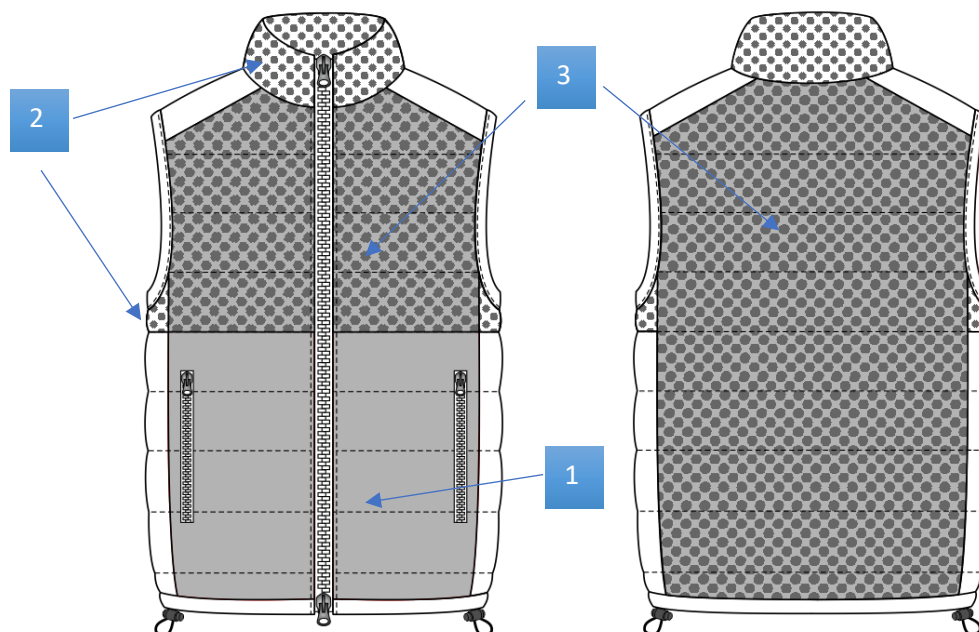
W konstrukcji kamizelki można wyróżnić 5 warstw (lub opcjonalnie 6 – w wariacie z aerożelem):

1. tkanina zewnętrzna (podszewka): 100% PA, o masie powierzchniowej 35 g/m²,
2. włóknina puszysta: 100% PES, o masie powierzchniowej 67 g/m²,
3. flizelina 3-warstwowa: 100% PP+100% PA+100% PES, o masie powierzchniowej 30 g/m²,
4. opcjonalnie aerożel krzemionkowy (granulat): o gęstości 120-150 kg/m³ i przewodności cieplnej ok. 0,012 W/m·K (w temp. 25°C),
5. włóknina z materiałami przemiany fazowej (PCM): 100% PES + powleczenie akrylowe z mikrokapsułkami PCM, o masie powierzchniowej 160 g/m²,
6. podszewka (tkanina zewnętrzna): 100% PA, o masie powierzchniowej 35 g/m².

Konstrukcja kamizelki bazuje na koncepcji „body mapping” czyli tzw. mapowaniu ciała. Jest to przełomowa koncepcja, która polega na analizie rozkładu temperatur i intensywności pocenia człowieka w trakcie wysiłku fizycznego. Pozwala to na odpowiedni dobór materiałów i właściwe dopasowanie odzieży dla zapewnienia użytkownikowi możliwie najlepszego komfortu termofizjologicznego (Ouzzahra et al., 2012; Fournet et al., 2013; Fournet et al., 2015).

Zgodnie z tą koncepcją materiał o właściwościach chłodzących (tzn. zawierający PCM) rozmieszczono w obszarach, w których temperatura skóry użytkownika wzrasta najbardziej podczas intensywnego wysiłku

oraz w obszarach o największej potliwości, tzn. w stójce, w części okrywającej klatkę piersiową i plecy oraz pod pachami (rys. 3).



Oznaczenia:

1 – aerożel

2 – włóknina z PCM

3 – aerożel + włóknina z PCM

Rys. 3. Schemat rozmieszczenia aerożelu i materiałów przemiany fazowej (PCM) w kamizelce ciepłochronnej z funkcją termoregulacji (fot. źródło własne)

Podstawową warstwą izolującą w całej kamizelce jest cienka włóknina poliestrowa z włókien ciągłych, o masie powierzchniowej 67 g/m². Włóknina ta przepikowana jest z tkaniną zewnętrzną. W obszarze klatki piersiowej i pleców, w celu podwyższenia poziomu ochrony przed zimnem, bez znacznego zwiększania masy i grubości kamizelki zastosowano dodatkowo aerożel krzemionkowy w formie drobnego granulatu. Aerożelem wypełnione są poprzeczne, wąskie kanały (3 cm i 2,5 cm), utworzone od wewnętrznej strony kamizelki przez odpowiednie przeszycie tkaniny podszewkowej z włókniną z PCM oraz flizeliną.

W miejscach pikowania tkaniny zewnętrznej z włókniną puszystą zastosowano szersze kanały, wypełnione większą masą aerożelu w celu wyeliminowania mostków cieplnych, które tworzą się na szwach. Konstrukcja kamizelki zapewnia jej uniwersalność. Pozwala na noszenie jej stroną z PCM do ciała (rys. 4a) lub do zewnątrz (rys. 4b) w zależności od przewidywanych warunków użytkowania.



a) strona z PCM do ciała

b) strona z PCM do zewnątrz

Rys. 4. Fotografie kamizelki ciepłochronnej z funkcją termoregulacji (*źródło własne*)

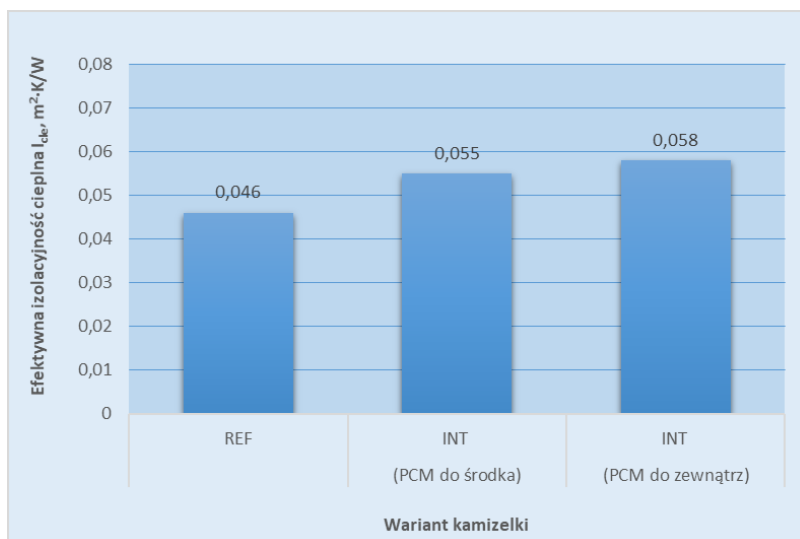
W przypadku dużej aktywności fizycznej kamizelka powinna być noszona stroną z PCM do ciała. Materiał z PCM zapewni wówczas przyjemne odczucie chłodzenia organizmu i zmniejszy wydzielanie potu. Przy pracach statycznych lub wymagających małej aktywności fizycznej bardziej korzystne jest odwrócenie kamizelki stroną z PCM do zewnątrz. Takie rozwiązanie zapewni lepszą izolację od środowiska zimnego.

Masa kamizelki w standardowym rozmiarze M wynosi ok. 482 g, z czego masa aerożelu stanowi tylko ok. 15,5% (74,5 g).

Ocena właściwości ochronnych i termoregulacyjnych kamizelki oraz jej wpływ na komfort cieplny i ergonomię

Ocena właściwości termoizolacyjnych kamizelki

Zastosowanie dodatków w kamizelce w postaci aerożelu i materiałów przemiany fazowej (PCM) pozwoliło na podwyższenie jej efektywnej izolacyjności cieplnej I_{de} , odpowiednio o ok. 20% w przypadku kamizelki nałożonej stroną chłodzącą z PCM do powierzchni manekina oraz o ok. 26% w przypadku kamizelki odwróconej stroną z PCM do zewnątrz (rys. 5). Uzyskane wyniki potwierdziły uniwersalność opracowanej kamizelki, tzn. możliwość dostosowywania jej izolacyjności do sytuacji i przewidywanych warunków użytkowania, poprzez noszenie jej na stronę lewą lub prawą.



Rys. 5. Porównanie izolacyjności cieplnej kamizelek ciepłochronnych (*źródło własne*)







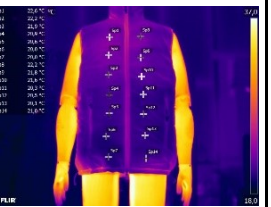
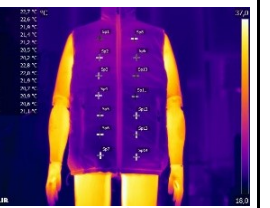
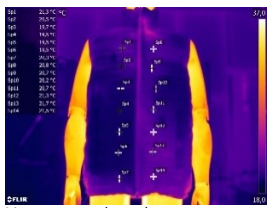



W celu oceny właściwości izolacyjnych opracowanej kamizelki badano także rozkład temperatury na jej powierzchni podczas pracy manekina termicznego. Badania prowadzono z wykorzystaniem kamery termowizyjnej w temp. 18 °C, przy prędkości ruchu powietrza ok. (0,08 ± 0,2) m/s.

Termogramy (tabela) wykazały, że średnia temperatura na powierzchni kamizelki inteligentnej w obszarze klatki piersiowej i brzucha niemal przez cały okres badania (tj. 30 min), za wyjątkiem momentu założenia, była niższa niż w przypadku kamizelki referencyjnej, co wskazuje na mniejsze straty ciepła z powierzchni manekina do otoczenia.

W przypadku kamizelki inteligentnej w miejscu brzucha, gdzie zastosowano sam aerożel temperatura od momentu założenia do końca badania wzrosła tylko o (0,6 - 0,7) °C (w zależności od strony kamizelki), podczas gdy w przypadku kamizelki referencyjnej odnotowano wzrost aż o 2,1 °C. Wyniki te potwierdzają izolacyjne działanie aerożelu.

Należy zwrócić uwagę, że bezpośrednio po założeniu kamizelki inteligentnej stroną z PCM do zewnątrz, temperatura na jej powierzchni w obszarze klatki piersiowej była znacznie niższa od temperatury kamizelki referencyjnej (tzn. aż o 1,7 °C), co potwierdza, że włóknina z PCM przy kontakcie z jej powierzchnią zapewnia odczucie chłodu. Podczas, gdy temperatura na powierzchni kamizelki referencyjnej już po 5 min badania ustabilizowała się na określonym poziomie, to w przypadku kamizelki inteligentnej odwróconej stroną z PCM do zewnątrz nawet po 30 min obserwowano dalszy wzrost. Temperatura ta wzrastała na skutek absorbowania przez PCM ciepła emitowanego z manekina. W tym przypadku powierzchnia manekina nie była jednak chłodzona przez PCM z uwagi na umiejscowienie włókniny z PCM po zewnętrznej stronie kamizelki, z dala od powierzchni manekina. Ponadto, dodatkową barierę stanowiła włóknina puszysta i aerożel.

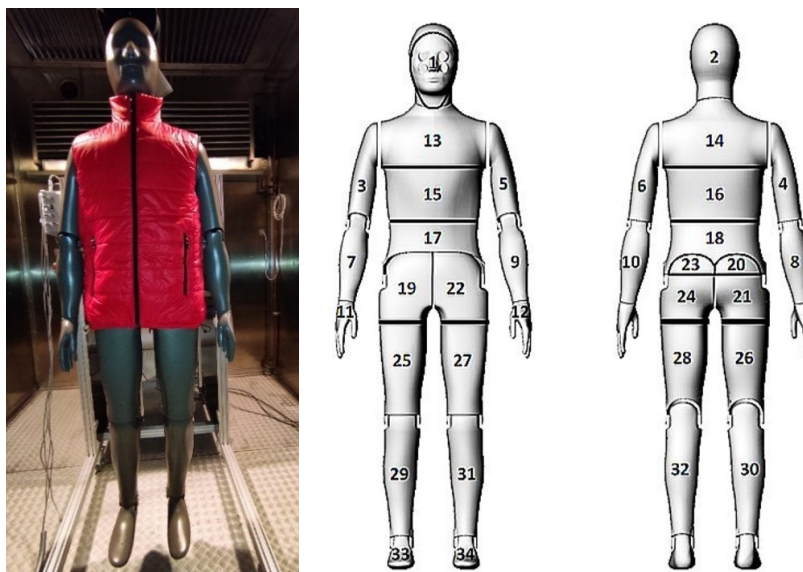
Tabela. Termogramy z kamery termowizyjnej (fot. źródło własne)

Wariant kamizelki	Założenie	+5 min	+10 min	+30 min
referencyjna	 kl. piers.: 22,2 (±1,2) °C brzuch: 19,5 (±0,3) °C	 kl. piers.: 23,2 (±1,0) °C brzuch: 21,1 (±0,9) °C	 kl. piers.: 23,2 (±0,8) °C brzuch: 21,6 (±0,6) °C	 kl. piers.: 23,2 (±0,8) °C brzuch: 21,6 (±0,6) °C
inteligentna (PCM do środka)	 kl. piers.: 21,1 (±0,4) °C brzuch: 20,2 (±0,3) °C	 kl. piers.: 22,1 (±0,6) °C brzuch: 20,4 (±0,3) °C	 kl. piers.: 22,1 (±0,4) °C brzuch: 20,4 (±0,4) °C	 kl. piers.: 22,3 (±0,4) °C brzuch: 20,8 (±0,4) °C
inteligentna (PCM do zewnątrz)	 kl. piers.: 20,5 (±0,5) °C brzuch: 20,5 (±0,9) °C	 kl. piers.: 22,1 (±0,6) °C brzuch: 20,2 (±0,6) °C	 kl. piers.: 22,1 (±0,9) °C brzuch: 20,4 (±0,7) °C	 kl. piers.: 22,7 (±0,5) °C brzuch: 21,2 (±0,6) °C

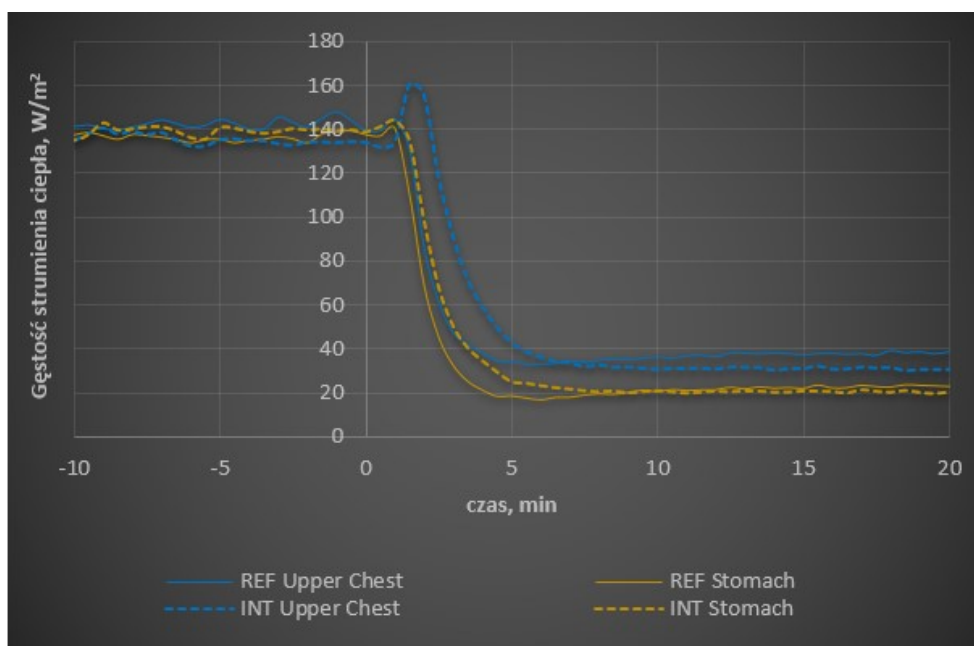
Ocena efektywności chłodzenia kamizelki

Potwierdzeniem chłodzącego działanie opracowanej kamizelki ciepłochronnej są m.in. wyniki badania gęstości strumienia ciepła z powierzchni manekina termicznego. Badania te prowadzono w temp. ok. 18 °C, przy prędkości ruchu powietrza (0,09±0,02) m/s i wilgotności względnej ok. (55-59) %.

Przykładowy wykres gęstości strumienia ciepła z manekina przedstawiono na rys. 7. W przypadku kamizelki inteligentnej (INT) bezpośrednio po jej założeniu na manekina obserwuje się wyraźnie wyższe wartości gęstości strumienia ciepła niż dla kamizelki referencyjnej (REF) w obszarze klatki piersiowej i pleców. W obszarach tych zastosowano bowiem włókninę z PCM, które pod wpływem temperatury manekina zaczynają się topić i odbierać ciepło z jego powierzchni. Skutkuje to zwiększeniem mocy dostarczanej do manekina w celu utrzymania jego stałej temperatury, tj. 34 °C.



Rys. 6. Widok kamizelki nałożonej na manekina termicznego Newton i schemat manekina z podziałem na segmenty (fot. źródło własne)



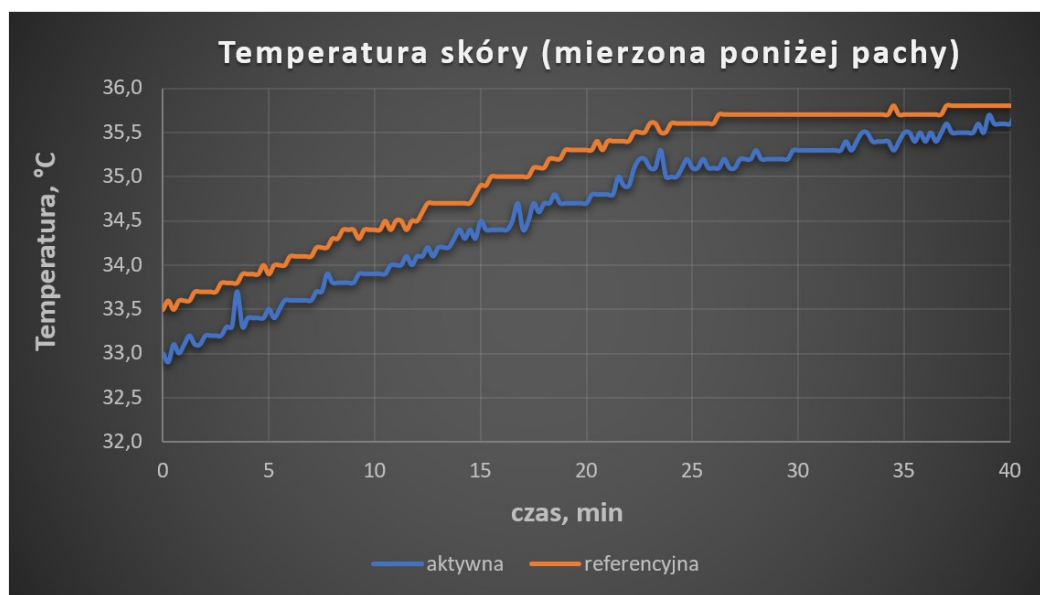
Rys. 7. Wykres zmian gęstości strumienia ciepła z manekina (przód) (fot. źródło własne)

Ocena komfortu cieplnego

Opracowaną kamizelkę ciepłochronną inteligentną i referencyjną poddano badaniom z udziałem ochotników w komorze klimatycznej w temp. -5°C przy prędkości powietrza $0,4\text{ m/s}$. Kamizelkę testowano w zestawie z bielizną termoaktywną oraz ocieplaną kurtką i spodniami typu narciarskiego. Przebieg badania przedstawiono na schemacie (rys. 8).



Rys. 8. Schemat przebiegu badania komfortu cieplnego w zestawie odzieżowym z kamizelką ciepłochronną (źródło własne)

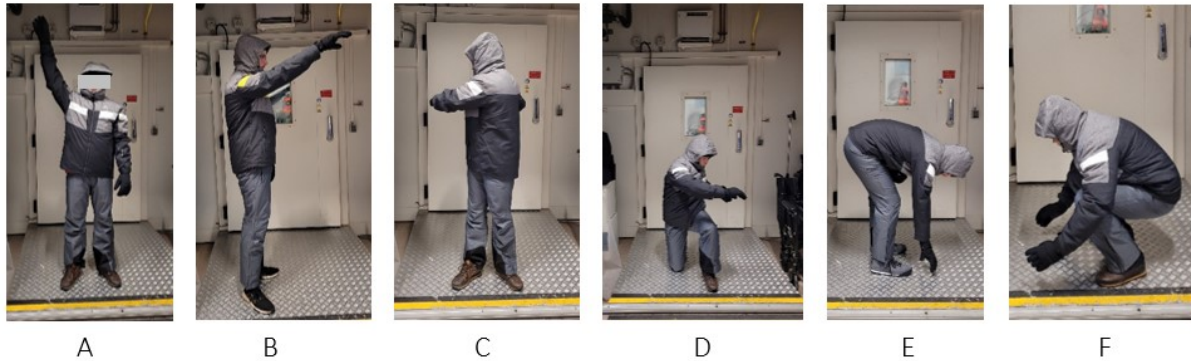


Rys. 9. Przebieg zmian lokalnej temperatury skóry (poniżej pachy) u wybranego ochotnika podczas badań w komorze klimatycznej (fot. źródło własne)

Lokalna temperatura skóry mierzona podczas testowania zestawu odzieżowego z kamizelką inteligentną (aktywną) przez większość badania była o ok. $0,5^{\circ}\text{C}$ niższa niż podczas użytkowania identycznego zestawu z kamizelką referencyjną (rys. 9).

Ocena ergonomiczna kamizelki (w zestawie z odzieżą wierzchnią)

Właściwości ergonomiczne kamizelki, w tym swobodę ruchów oceniano podczas wykonywania różnych aktywności symulujących rzeczywiste czynności wykonywane na stanowiskach pracy w warunkach mikroklimatu zimnego (rys. 10).



Rys. 10. Ćwiczenia ruchowe wykonywane podczas testowania kamizelki (fot. źródło własne)

Uczestnicy badań pozytywnie ocenili odzież. Niewielkie ograniczenia ruchowe zgłosiło tylko 2 uczestników podczas wykonywania skrętów tułowia w pozycji klęcznej (klęk na jedno kolano) (rys. 10D). W przypadku pozostałych aktywności odzież zapewniała pełną swobodę ruchów.

Podsumowanie

Opracowane w CIOP-PIB nowe rozwiązanie w postaci dwustronnej inteligentnej kamizelki ciepłochronnej stanowi dobrą alternatywę dla obecnie stosowanej grubej i ciężkiej odzieży ciepłochronnej, szczególnie dla pracowników narażonych na częste i duże wahania temperatur i/lub wykonujących prace o różnym obciążeniu. Dzięki zastosowaniu materiałów przemiany fazowej (PCM) możliwe jest ograniczenie obciążenia cieplnego pracowników w mikroklimacie zimnym, a dodatek aerożelu stanowi skuteczną barierę przed przenikaniem zimnego powietrza z zewnątrz oraz nadmiernym ubytkiem ciepła z organizmu. Pozytywna ocena kamizelki pod względem komfortu cieplnego i ergonomii w symulowanych warunkach użytkowania potwierdziła możliwość jej stosowania w środowisku zimnym przy różnym obciążeniu fizycznym, w zestawie z odzieżą wierzchnią.

Bibliografia

- Aegerter MA., Leventis N., Koebel MM.: *Aerogels Handbook. Advances in Sol-Gel Derived Materials and Technologies*. New York: Springer, 2011.
- Angelova RA.: Working in Cold Environment: Clothing and Thermophysiological Comfort. In: Korhan O. (ed.) *Occupational health*. IntechOpen, 2017.
- Bogdan A., Marszałek A., Bugajska J., Zwolińska M.: *Oddziaływanie środowiska termicznego na organizm człowieka*. Warszawa: CIOP-PIB, 2012.
- Dąbrowska A.: The impact of structural solutions used in clothing protective against cold on its thermal insulation. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 2016, 28(6): s. 1-6.
- Fournet D. et al.: Body mapping of thermoregulatory and perceptual responses of males and females running in the cold, *Journal of Thermal Biology*, 2013, Volume 38, Issue 6, pp. 339-344, <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2013.04.005>.
- Fournet D., Redortier B. and Havenith G.: *Extreme Physiology & Medicine* 2015, 4(Suppl 1):A74.
- Grether WF.: Human performance at elevated environmental temperature. *Aerospace Med.*, 1973, 44: s. 747-755.
- Havenith G.: Heat balance when wearing protective clothing. *Ann. OccUP. Hyg.*, 1999, 43(5): s. 289-296.
- Koradecka D.: *Bezpieczeństwo i higiena pracy*. Warszawa: CIOP-PIB, 2008.
- Křemenáková D., Militký J., Venkataraman M., Mishra R.: Chapter 20. Thermal Insulation and Porosity—From Macro- to Nanoscale. In: Šesták J., Hubík P., Mareš J.J. (eds.), *Thermal Physics and Thermal Analysis*. Springer International Publishing, 2017, pp. 425-448.
- Łastowiecka-Moras E.: Praca w środowisku zimnym jako czynnik ryzyka chorób układu krążenia. *Bezpieczeństwo Pracy: Nauka i Praktyka*, 2014, 2: s. 4-7.
- Mäkinen H., Jussila K.: Cold-protective clothing: types, design and standards. In: Wang F., Gao. G. (eds.). *Protective clothing: Managing thermal stress*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, Textile Institute, 2014, pp. 3-38. DOI: 10.1016/C2013-0-16439-2.
- Mäkinen H., Tammela E., Andersen P.: Kylmänsuojavaatetus pakkasvarastossa' In Finnish. English summary. [Cold protective clothing in cold stores]. *Res Finnish Inst Occup Health*, 1984, 2(1): s. 17-32.
- Marszałek A., Bartkowiak G., Dąbrowska A.: Assessment of the effectiveness of modular clothing protecting against the cold based on physiological tests. *Int J Occup Saf Ergon.*, 2018, 24(4):534-545. doi: 10.1080/10803548.2017.1376927.
- Marszałek A.: Wpływ zimnego środowiska na organizm człowieka. *Bezpieczeństwo Pracy: Nauka i Praktyka*, 2009, 1: s. 10-12.
- Marszałek A., Bartkowiak G.: Odzież ochronna do pracy w zimnym środowisku – zasady projektowania i doboru. *Bezpieczeństwo Pracy: Nauka i Praktyka*, 2013, 2: s. 8-12.

- Norris PM., Shrinivasan S.: Aerogel: unique material, fascinating properties and unlimited applications. Annual Review of heat transfer. 2005, 14: s. 394-395.
- Ouzzahra Y., Havenith G. and Redortier B.: Regional distribution of thermal sensitivity to cold at rest and during mild exercise in males, Journal of Thermal Biology, 2012, Volume 37, Issue 7, pp. 517- 523, <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2012.06.003>.
- Ramesh Babu V., Arunraj A.: Thermo regulated clothing with phase change materials. J Textile Eng Fashion Technol, 2018, 4(5): s. 344–347.
- Sudoł-Szopińska I., Łuczak A.: Wpływ temperatury środowiska zewnętrznego na sprawność działania człowieka. Bezpieczeństwo Pracy: Nauka i Praktyka, 2006, 7-8: s. 16-19.
- Zwolińska M., Bogdan A.: Związki zmiennofazowe w zastosowaniach techniczno-użytkowych i ergonomicznych. Bezpieczeństwo Pracy, 2012, 4: s. 22-25.