



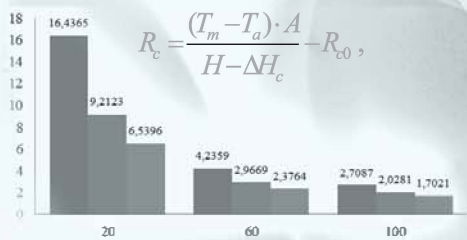
Politechnika Łódzka

# WYBRANE ZAGADNIENIA Z METROLOGII UŻYTKOWEJ ODZIEŻY FUNKCJONALNEJ

Izabella Krucińska, Ryszard Korycki, Ewa Skrzetuska  
Krzysztof Kowalski, Adam Puszkarz



$$I_t = \frac{\left[ \left( \sum_i f_i \cdot T_{si} \right) - T_a \right] A}{\sum_i H_{ci}}$$



$$R_c = \frac{(T_m - T_a) \cdot A}{H - \Delta H_c} - R_{c0}$$

MONOGRAFIE POLITECHNIKI ŁÓDZKIEJ  
ŁÓDŹ 2016

# **WYBRANE ZAGADNIENIA Z METROLOGII UŻYTKOWEJ ODZIEŻY FUNKCJONALNEJ**

Izabella Krucińska, Ryszard Korycki, Ewa Skrzetuska  
Krzysztof Kowalski, Adam Puszkarz

Monografie Politechniki Łódzkiej

Łódź 2016

Recenzenci:

**dr hab. inż. Marina Michalak, prof. SAN**  
**dr hab. inż. Małgorzata Zimmiewska, prof. IWNiRZ**

Redaktor Naukowy Wydziału Technologii Materiałowych  
i Wzornictwa Tekstyliów  
**dr hab. inż. Małgorzata Matusiak**

Autorzy:

<b>prof. dr hab. inż. Izabella Krucińska</b>	1.1, 1.2, 1.7, 1.8, 2.1, 2.3, 2.6, 2.7
<b>prof. dr hab. inż. Ryszard Korycki</b>	1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.11, 2.4, 2.9
<b>dr inż. Ewa Skrzetuska</b>	1.7, 1.8, 2.1, 2.2, 2.3, 2.6, 2.7
<b>prof. dr hab. inż. Krzysztof Kowalski</b>	2.5, 2.6, 2.7
<b>dr Adam Puszkarz</b>	1.9, 1.10, 2.8

Projekt okładki:  
**mgr sztuki Włodzimierz Dondzik**

© Copyright by Politechnika Łódzka 2016

**WYDAWNICTWO POLITECHNIKI ŁÓDZKIEJ**

90-924 Łódź, ul. Wólczańska 223

tel. 42-631-20-87, 42-631-29-52

fax 42-631-25-38

e-mail: [zamowienia@info.p.lodz.pl](mailto:zamowienia@info.p.lodz.pl)

[www.wydawnictwa.p.lodz.pl](http://www.wydawnictwa.p.lodz.pl)

**ISBN 978-83-7283-808-7**

Nakład 100 egz. Ark. druk. 18,0. Papier offset. 80 g, 70 x 100

Druk ukończono w grudniu 2016 r.

Wykonano w Drukarni Quick-Druk, 90-562 Łódź, ul. Łąkowa 11

Nr 2205

*Prace badawcze do prezentowanej książki były współfinansowane z Projektu pt. „Optymalizacja struktury ubioru ochronnego dla noworodków urodzonych przedwcześnie przy zastosowaniu oryginalnych narzędzi wspomagających proces projektowania” UMO-2011/03/B/ST8/06275, finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki i Projektu pt. „Nowoczesne ochrony osobiste służb ratowniczych KSRRG w oparciu o potrzeby użytkowników końcowych”, O ROB 0014 01/ID14/1, finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju oraz z prac statutowych Wydziału Technologii Materiałowych i Wzornictwa Tekstyliów, Politechniki Łódzkiej.*





## SPIS TREŚCI

<b>1. WYBRANE ZAGADNIENIA Z METROLOGII UŻYTKOWEJ ODZIEŻY OCHRONNEJ</b> .....	9
1.1. Wstęp.....	9
1.2. Analiza fizjologii użytkownika odzieży ochronnej i określenie podstawowych wielkości tworzących komfort cieplny .....	13
1.2.1. Założenia bilansu .....	13
1.2.2. Podstawowe sformułowanie bilansowe .....	15
1.2.3. Metabolizm .....	16
1.2.4. Efektywna praca mechaniczna .....	20
1.2.5. Przepływ ciepła przez przewodzenie .....	20
1.2.6. Przepływ ciepła w ubiorze przez konwekcję .....	20
1.2.7. Utrata ciepła przez promieniowanie .....	23
1.2.8. Sucha wymiana ciepła realizowana przez ubiór .....	24
1.2.9. Utrata ciepła przez parowanie na powierzchni skóry .....	28
1.2.10. Utrata ciepła przez konwekcję w układzie oddechowym .....	29
1.2.11. Utrata ciepła przez parowanie w układzie oddechowym .....	29
1.3. Analiza jakościowa bilansu cieplnego .....	30
1.4. Analiza ilościowa bilansu cieplnego .....	31
1.4.1. Wymagana gęstość strumienia utraty ciepła przez parowanie z powierzchni skóry, wymagana wilgotność skóry i wymagany wydatek potu .....	32
1.4.2. Określenie temperatury rektalnej .....	33
1.5. Omówienie struktury programu obliczeniowego .....	34
1.5.1. Wczytanie bazowych wartości parametrów .....	35
1.5.2. Określenie maksymalnego wydatku potu $S_{w_{max}}$ jako funkcji wydatku metabolizmu .....	36
1.5.3. Określenie temperatury rdzenia ciała, która odpowiada aktualnemu wydatkowi metabolizmu .....	37
1.5.4. Określenie temperatury skóry .....	37
1.5.5. Charakterystyka właściwości cieplnych odzieży .....	38
1.5.6. Określenie wszystkich składników wymiany ciepła .....	39
1.5.7. Algorytm wyznaczania temperatury .....	40
1.5.8. Określenie temperatury rdzenia ciała .....	41
1.5.9. Określenie temperatury rektalnej .....	41
1.5.10. Wydruk następujących wyników .....	42
1.6. Wnioski płynące z analizy wieloparametrowego bilansu ciepła dla użytkownika odzieży .....	42
1.7. Metody pomiaru właściwości biofizycznych odzieży ochronnej z grupy ŚOI wpływających na komfort fizjologiczny użytkownika .....	43

1.7.1. Metodyka badań właściwości biofizycznych materiałów odzieżowych w warunkach ustalonego przepływu ciepła.....	45
1.7.2. Metodyka badań właściwości biofizycznych odzieży ochronnej w warunkach ustalonych .....	49
1.8. Ocena właściwości biofizycznych odzieży ochronnej dla strażaków .....	56
1.8.1. Charakterystyka materiału badawczego .....	57
1.8.2. Wyniki badań właściwości biofizycznych materiałów przeznaczonych na odzież ochronną dla strażaków .....	58
1.8.3. Wyniki badań właściwości biofizycznych odzieży ochronnej dla strażaków.....	61
1.8.4. Wnioski odnoszące się do oceny właściwości biofizycznych odzieży ochronnej dla strażaków .....	63
1.9. Modelowanie i analiza zjawisk transportu energii w tekstyliach .....	64
1.9.1. Wstęp .....	64
1.9.2. Przykłady modeli geometrycznych płaskich wyrobów włókienniczych .....	64
1.9.3. Symulacje zjawisk transportu energii w tekstyliach.....	68
1.9.3.1. Podstawy fizyczne symulacji transportu ciepła.....	68
1.9.3.2. Podstawy modelowania zjawisk fizycznych.....	69
1.10. Analiza zjawiska transportu energii cieplnej w odzieży ochronnej dla strażaków .....	72
1.10.1. Wnioski wynikające z symulacji zjawisk transportu strumienia ciepła przez materiały stosowane w odzieży strażackiej przy użyciu programu <i>SolidWorks</i> .....	76
1.11. Analiza sprzężonego transportu masy i ciepła w kompozytowym ubiorze włókienniczym .....	78
1.11.1. Założenia bilansu, Model fizyczny sprzężonego przewodzenia ciepła i masy.....	78
1.11.2. Ogólne założenia modelu wymiany masy i ciepła .....	78
1.11.3. Określenie skali rozwiązania zagadnienia .....	81
1.11.4. Metody homogenizacji konstrukcji włókienniczych w wymianie masy i ciepła .....	82
1.11.5. Model matematyczny sprzężonej wymiany masy i ciepła .....	84
1.11.5.1. Określenie zależności dla modelu matematycznego ...	85
1.11.5.2. Uproszczenie modelu matematycznego.....	92
1.11.5.3. Najbardziej typowe postacie warunków brzegowych .	93
1.11.6. Modelowanie numeryczne wybranych kompozycji materiałowych przeznaczonych na odzież dla strażaków .....	95
1.11.7. Wnioski odnoszące się do symulacji transportu strumienia ciepła i masy przez materiały przeznaczone na odzież strażacką .....	107

<b>2. WYBRANE ZAGADNIENIA Z METROLOGII UŻYTKOWEJ ODZIEŻY DLA WCZEŚNIAKÓW .....</b>	<b>109</b>
2.1. Wstęp.....	109
2.2. Omówienie rozwiązań surowcowych i konstrukcyjnych odzieży dla niemowląt przedwcześnie urodzonych .....	114
2.3. Wymagania stawiane odzieży przez organizacje konsumenckie .....	118
2.3.1. Certyfikat ÖekoTex Standard 100 „Tekstylią godne zaufania zbadane na substancje szkodliwe według Oeko–Tex Standard 100” .....	118
2.3.2. Certyfikat Global Organic Textile Standard (GOTS).....	119
2.4. Opracowanie modelu fizycznego i matematycznego transportu masy i ciepła przez dyskretne struktury wyrobu włókienniczego w układzie: skóra noworodka – wyrób włókienniczy – otoczenie .....	122
2.4.1. Modelowanie systemu: skóra noworodka – kompozyt włókienniczy – otoczenie .....	123
2.4.2. Wymiana strumienia ciepła w układzie: skóra noworodka – wyrób włókienniczy – otoczenie w ujęciu fizjologicznym .....	123
2.4.3. Opracowanie metodyki weryfikacji opracowanego modelu w oparciu o metody pomiarowe odnoszące się do wyrobów płaskich .....	128
2.4.4. Wnioski wynikające z modelu transportu masy i ciepła dla noworodka.....	141
2.5. Opracowanie założeń konstrukcyjnych i wykonanie prototypów ubiorów ochronnych dla niemowląt przedwcześnie urodzonych w dwóch fazach ich życia przed i po rozwinięciu warstwy rogowej skóry .....	142
2.5.1. Dzianiny dwuwarstwowe .....	142
2.5.2. Dzianiny lewoprawe „gładkie” i pluszowe .....	149
2.6. Charakterystyka wytworzonych płaskich wyrobów włókienniczych przeznaczonych na odzież dla noworodków .....	150
2.6.1. Analiza właściwości sensorycznych wytworzonych wariantów dzianin .....	153
2.6.2. Analiza właściwości biofizycznych wytworzonych wariantów dzianin .....	161
2.6.2.1. <i>Metoda oceny transportu wilgoci w postaci ciekłej w dzianinach dwuwarstwowych testem rozplywu kropli .....</i>	<i>161</i>
2.6.2.2. <i>Ocena sorpcji dynamicznej, oporu cieplnego i pary wodnej .....</i>	<i>165</i>
2.6.3. Wnioski wynikające z analizy właściwości biofizycznych wytworzonych wariantów dzianin .....	188

2.7. Ocena wytworzonych wariantów odzieży dla noworodków z zastosowaniem omawianych płaskich wyrobów włókienniczych ....	190
2.7.1. Charakterystyka manekina termicznego.....	191
2.7.2. Wyniki badań właściwości biofizycznych odzieży dla wcześniaków .....	193
2.7.3. Wnioski wynikające z oceny laboratoryjnej ubrań dla dzieci przedwcześnie urodzonych .....	211
2.8. Analiza zjawiska transportu energii cieplnej w dzianinach konduktywno-dyfuzyjnych i laminatach przy użyciu oprogramowania <i>SolidWorks</i> .....	212
2.8.1. Przyjęte warunki symulacji .....	212
2.8.2. Wyniki symulacji energii cieplnej przez układy dzianin.....	214
2.8.3. Wnioski wynikające z symulacji przepływu strumienia ciepła przez wybrane wyroby włókiennicze przy użyciu oprogramowania <i>SolidWorks</i> .....	220
2.9. Opracowanie programu komputerowego do symulacji transportu masy i ciepła przez dyskretne struktury wyrobu włókienniczego służące do ochrony noworodków przedwcześnie urodzonych,.....	223
2.9.1. Sformułowanie problemu .....	223
2.9.2. Adaptacja problemu do warunków czepka noworodka.....	226
2.9.3. Wyniki symulacji numerycznych .....	229
2.9.4. Wnioski wynikające z symulacji sprzężonego transportu ciepła i masy przez dzianiny .....	270
Literatura .....	273

# 1. WYBRANE ZAGADNIENIA Z METROLOGII UŻYTKOWEJ ODZIEŻY OCHRONNEJ

## 1.1. Wstęp

Rozwój technologii nowych materiałów, sposobu ich przetwarzania i wykorzystywania, a także coraz lepsze poznanie mechanizmów zachodzących w organizmie człowieka sprzyjają rozwojowi odzieży specjalnego przeznaczenia. Odzież już nie stanowi wyłącznie bariery przed zimnem, ale również ma za zadanie stanowić barierę przed czynnikami szkodliwymi, skrajnymi warunkami termicznymi, a także wspomagać funkcjonowanie organizmu jej użytkownika w warunkach ekstremalnych. Obecnie coraz większą uwagę zwraca się na zachowanie optymalnych warunków, w jakich powinien żyć i pracować człowiek, ponieważ zostało potwierdzone, że manualne i intelektualne zdolności człowieka osiągają swoje optimum w warunkach komfortu cieplnego. W tym kontekście problem odzieży ochronnej zapewniającej optymalny komfort cieplny użytkownika nabiera szczególnego znaczenia. Podstawowym celem stosowanych, nowych kompozycji materiałowych, używanych w odzieży ochronnej jest zapewnienie równowagi bilansu cieplnego użytkownika w zróżnicowanych warunkach wydatku metabolicznego. Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Pracy i Polityki Socjalnej z dnia 26.09 1997 r. w sprawie ogólnych przepisów bezpieczeństwa i higieny pracy wraz z późniejszymi zmianami Dz.U. z 2011 r. nr 173 poz. 1034 [1] pracodawca zobowiązany jest do zapewnienia pracownikom w miejscu pracy bezpieczeństwo i higienę pracy. Bezpieczeństwo to w dużym stopniu zależy od stosowanych środków ochrony indywidualnej. Przez środek ochrony indywidualnej według definicji podanej w omawianym rozporządzeniu rozumie się cyt.: „...wszelkie środki noszone lub trzymane przez pracownika w celu jego ochrony przed jednym lub większą liczbą zagrożeń związanych z występowaniem niebezpiecznych lub szkodliwych czynników w środowisku pracy, w tym również wszelkie akcesoria i dodatki przeznaczone do tego celu”. Załącznik drugi tego rozporządzenia określa szczegółowe zasady stosowania środków ochrony indywidualnej. W paragrafie drugim tego załącznika czytamy między innymi cyt.: „Dostarczone pracownikom do stosowania środki ochrony indywidualnej powinny: [...] uwzględniać wymagania ergonomii oraz stan zdrowia pracownika”. Wymagania stawiane środkom ochrony indywidualnej regulowane są kolejnym rozporządzeniem Ministra Gospodarki z dnia 21 grudnia 2005 r. w sprawie zasadniczych wymagań dla środków ochrony indywidualnej [2]. W rozporządzeniu tym w rozdziale 2, paragrafie 7.1 znajdziemy również zapis odnoszący się do ergonomii środków ochrony indywidualnej w postaci cyt.: „Środki ochrony indywidualnej powinny [...] być zaprojektowane oraz wykonane zgodnie z wymaganiami ergonomii” i „materiały, z których są wyprodukowane [...] nie powinny wpływać niekorzystnie na zdrowie lub higienę użytkownika”. Akty prawne wydawane w Polsce i związane z zagadnieniami środków ochrony indywidualnej muszą być zgodne z Dyrektywą

Europejską 89/686/EEC [3, 4] regulującą zagadnienia wprowadzania ŚOI (środki ochrony indywidualnej) na rynek europejski i określającą wymagania stawiane tym środkom. W jednym z wymagań stawianych przez omawianą Dyrektywę jest stwierdzenie, iż środki ochrony osobistej powinny spełniać wymagania związane z zapewnieniem komfortu użytkownikowi. To lakoniczne stwierdzenie niesie za sobą potrzebę określenia co rozumie się pod tym pojęciem.

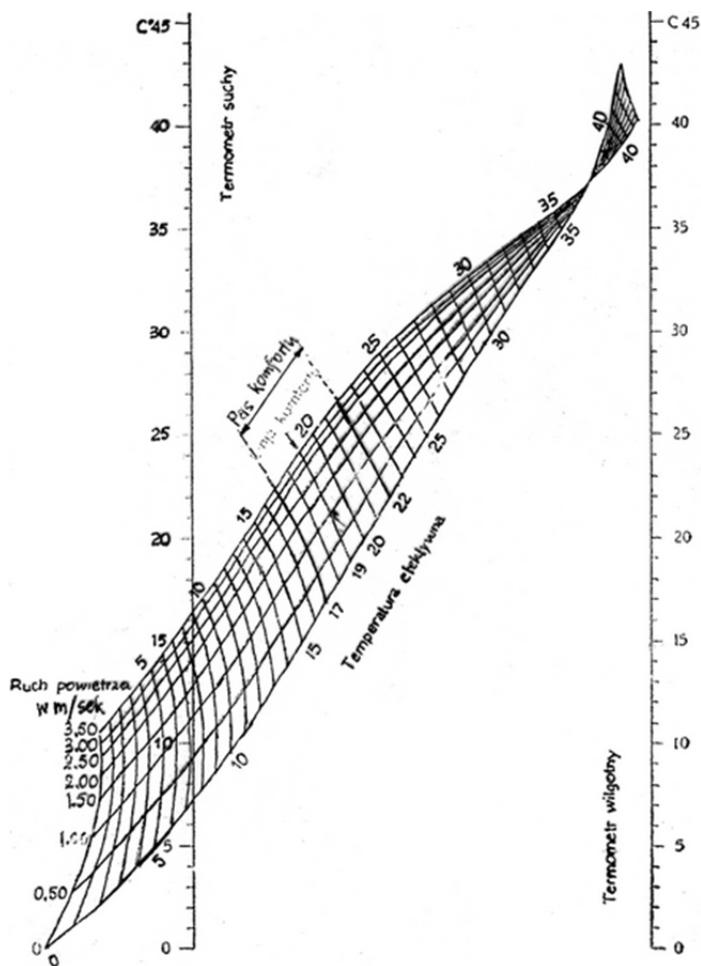
Definicję komfortu znajdujemy w książce pt. „Metrologia włókiennicza, tom IV”, która jest dziełem zbiorowym przygotowanym pod redakcją prof. Wojciecha Szmeltera [5]. Pojęcie komfortu użytkowego odzieży można określić, jako cyt.: „*stan przyjemnej fizjologicznej, psychologicznej i fizycznej harmonii między istotą człowieka a otoczeniem*”. Z tej definicji wynikają trzy składowe komfortu użytkowego odzieży:

- komfort fizjologiczny,
- komfort sensoryczny,
- komfort psychiczny.

Komfort fizjologiczny jest określany właściwościami odzieży, które decydują o zachowaniu równowagi bilansu cieplnego, a więc o regulacji temperatury i transportu wilgoci pomiędzy organizmem człowieka a otoczeniem. Komfort sensoryczny jest związany z mechanicznymi właściwościami wyrobu i jest opisywany kompletnym wskaźnikiem zwanym chwytem. Związany jest on z pobudzeniem sensorów dotyku rozmieszczonych na naszym ciele w wyniku zaistnienia kontaktu pomiędzy skórą człowieka a materiałem, z którego wykonano daną odzież [5]. Komfort psychiczny jest niejako wypadkową komfortu sensorycznego i fizjologicznego, ale też jest związany z pojęciem estetyki i gustu użytkownika. Brak poczucia komfortu fizjologicznego i sensorycznego powoduje obniżenie poczucia komfortu psychicznego. Jednak komfort psychiczny ma znacznie szersze pojęcie. Wpływ na nasze odczucia psychiczne mają również bodźce odbierane z otoczenia, niezwiązane z warunkami atmosferycznymi czy samym ubiorem.

Pomiędzy organizmem człowieka a otoczeniem zachodzi ciągła wymiana ciepła, która odbywa się głównie z powierzchni skóry, w mniejszym stopniu przez drogi oddechowe. Około 80-90% ciepła jest wydalone przez skórę na drodze biernej lub czynnej. Bierna wymiana ciepła polega na czysto fizycznym przechodzeniu ciepła z ośrodka o wyższej temperaturze do ośrodka o temperaturze niższej. Oddawanie ciepła na drodze biernej odbywa się przez: przewodzenie, konwekcję i promieniowanie. Należy zauważyć, że bierna wymiana ciepła z otoczeniem umożliwia zarówno oddawanie, jak i pobieranie energii cieplnej, a więc możliwe jest zarówno wychłodzenie, jak i przegrzanie organizmu. Czynna utrata ciepła zachodzi wówczas, gdy bierna utrata ciepła staje się niedostateczna (grozi nam przegrzanie) i polega na odparowaniu potu z powierzchni skóry, a więc jest to proces, w którym zawsze następuje oddanie ciepła do otoczenia. Po dłuższym okresie oddziaływania stałego środowiska cieplnego oraz przy niezmiennym intensywności procesów metabolicznych ustala się w organizmie stan równowagi termicznej, a zatem ilość ciepła wytwarzanego jest równa ilości

ciepła z niego wydalanego i nie będzie zachodziła akumulacja ciepła w organizmie. Ponieważ odczucie ciepła jest subiektywne i zależne od wielu czynników zewnętrznych, wprowadzono pojęcie temperatury efektywnej. Jest to „subiektywne poczucie ciepła lub chłodu uwarunkowane przez takie czynniki powietrza, jak: temperatura, wilgotność i stan ruchu powietrza. Została stworzona odpowiednia skala temperatur efektywnych [6], na której zaznaczono granice, które nazwano pasem komfortu cieplnego (rys. 1).



Rys. 1. Skala temperatur efektywnych

Źródło: [6].

Prawidłowo dobrana odzież, w zależności od wielkości wydatku energii związanego z obciążeniem pracą i od warunków zewnętrznych, powinna stanowić izolację termiczną – chronić przed wychłodzeniem organizmu, a jednocześnie nie dopuszczać do jego przegrzania. Wysoka temperatura i niska wilgotność utrudniają wydzielanie się ciepła na zewnątrz. W takim przypadku



zwiększa się wydzielanie potu, którego parowanie obniża temperaturę ciała. Duże znaczenie dla dobrej izolacji cieplnej ma utrzymanie w sąsiedztwie skóry suchego powietrza oraz zapobieganie gromadzeniu się potu, który jest dobrym przewodnikiem ciepła [6].

Niniejsza monografia jest poświęcona zagadnieniom komfortu fizjologicznego, którego brak może spowodować uszczerbek na zdrowiu użytkownika, a nawet w skrajnych przypadkach śmierć. Składa się ona z kilku rozdziałów obrazujących metodykę stosowaną do analizy właściwości ergonomicznych odzieży w aspekcie kreowania optymalnego komfortu fizjologicznego użytkownika.

Funkcjonowanie organizmu człowieka uzależnione jest od jego temperatury. Człowiek należy do organizmów stałocieplnych, którego temperatura jest względnie stała i niezależna od warunków otoczenia. W organizmie ssaków jednak pod wpływem zbyt drastycznych warunków środowiskowych może dojść do zaburzenia homeostazy, czyli zdolności do samoregulacji procesów biologicznych. Istotną wielkością fizyczną wpływającą na zaburzenie homeostazy jest temperatura ciała człowieka. Zbytne wychłodzenie ciała człowieka już poniżej 35°C powoduje występowanie hipotermii. W przypadku hipotermii bilans cieplny organizmu jest ujemny, czyli ilość ciepła wytwarzanego w wyniku przemian metabolicznych jest mniejsza niż ilość ciepła traconego przez organizm. Identyfikacja spadku temperatury poniżej wartości prawidłowej (poniżej punktu nastawienia) przez receptory jest przekazywana do podwzgórza. W wyniku reakcji biochemicznej podwzgórza wymuszana jest reakcja tym razem efektorów głównie mięśni, która ma za zadanie przywrócić wartość temperatury do wartości punktu nastawienia. Drugim skrajnym przypadkiem zaburzającym prawidłową pracę organizmu jest hipertermia – stan podwyższonej temperatury spowodowany czynnikami zewnętrznymi lub wewnętrznymi powodującymi wystąpienie w organizmie nadmiaru energii cieplnej. Stan taki grozi uszkodzeniu mózgu. W temperaturze powyżej 40°C występuje denaturacja białek. W tym przypadku również włączany jest system termoregulacji fizjologicznej oparty na odruchach bezwarunkowych, na przykład występowanie dreszczy czy tak zwanej gęsiej skórki przy obniżonej temperaturze, czy efekt pocenia się przy podwyższonej temperaturze. W stanie hipotermii następuje obkurczanie naczyń krwionośnych, a w stanie hipertermii ich rozkurczanie celem zwiększenia wymiany ciepła z otoczeniem [7]. Innym mechanizmem obronnym człowieka jest termoregulacja behawioralna, czyli odpowiedni dobór odzieży do warunków otoczenia gwarantujący prawidłową wymianę ciepła między organizmem a otoczeniem. Oba mechanizmy termoregulacji behawioralny i fizjologiczny muszą prowadzić do zachowania równowagi bilansu cieplnego organizmu [7]. Omówienie zagadnień odnoszących się do behawioralnej termoregulacji gwarantującej hemostazę organizmu człowieka w warunkach określonego wysiłku fizycznego jest przedmiotem niniejszej monografii.

## 1.2. Analiza fizjologii użytkownika odzieży ochronnej i określenie podstawowych wielkości tworzących komfort cieplny

Komfort fizjologiczny jest określany właściwościami odzieży, które decydują o zachowaniu równowagi bilansu cieplnego, a więc o regulacji temperatury i transportu wilgoci pomiędzy organizmem człowieka a otoczeniem [5]. Zgodnie z informacjami zawartymi w podręczniku [5] procentowy udział poszczególnych procesów dla ludzkiego ciała przebywającego w warunkach, w których zachodzi utrata strumienia ciepła przez ciało jest następujący:

- unoszenie – 31,00%,
- promieniowanie – 43,74%,
- parowanie – 21,71%,
- nagrzewanie pokarmu – 1,55%,
- nagrzewanie powietrza w płucach – 1,30%,
- straty cieplne przy wydalaniu – 0,70%.

Bilans transportu ciepła lub alternatywnie sprzężonego transportu masy i ciepła można utworzyć posługując się dwiema podstawowymi metodami. W pierwszej metodzie rozpatruje się fizjologię użytkownika odzieży, czyli uwzględnia się w bilansie źródło ciepła w postaci metabolizmu ciała ludzkiego oraz różne mechanizmy jego utraty przez organizm. Głównym układem odniesienia jest zawsze ciało użytkownika. Wpływ odzieży i wprowadzenie różnych mechanizmów utraty ciepła (promieniowanie, pocenie się, konwekcja itp.) są modelowane zależnościami typowymi dla danej metody transportu, z poszczególnymi wielkościami i współczynnikami w większości określanymi empirycznie. W ujęciu tym nie rozpatruje się zasadniczo transportu masy (wilgoci). Jedyne opisy fizyczne dotyczą tylko parowania, czyli wspólnego transportu ciepła z masą. W drugiej metodzie rozpatruje się samą odzież. Główny punkt odniesienia to materiał, ciało człowieka i otoczenie są modelowane za pomocą odpowiednich warunków brzegowych. W tym przypadku rozpatruje się wszystkie zjawiska fizyczne zachodzące w materiale, co prowadzi do sformułowania równań transportu. Transport ciepła lub sprzężony transport ciepła i masy jest opisywany za pomocą równań różniczkowych drugiego rzędu z uwagi na zmienne stanu i pierwszego rzędu z uwagi na czas. Fizjologia użytkownika jest więc uwzględniana w sposób pośredni, w opisie warunków brzegowych i początkowych.

### 1.2.1. Założenia bilansu

Model transportu ciepła w ciele użytkownika wykorzystuje sformułowanie bilansowe, które jest określane dla szeregu danych wejściowych, które możemy podzielić na dwie grupy: parametry otoczenia i ubioru oraz parametry użytkownika. Do parametrów otoczenia należą:

- temperatura powietrza  $T_a$  określona w  $^{\circ}\text{C}$ ,
- średnia temperatura promieniowania  $T_r$  określona w  $^{\circ}\text{C}$ ,

- ciśnienie cząstkowe pary wodnej  $p_a$  określone w  $kPa$ ,
- prędkość powietrza  $v_a$  określona w  $ms^{-1}$ ,
- temperatura ubioru  $T_{cl}$  określona w  $^{\circ}C$ ;
- charakterystyka cieplna ubioru określana według ISO 9920 [8].

Do parametrów użytkownika ŚOI należą:

- wydatek metabolizmu na jednostkę powierzchni ciała  $M$  obliczany zgodnie z ISO 8996 [9], określony w  $Wm^{-2}$ ,
- temperatura rektalna  $T_{re}$  określona w  $^{\circ}C$ .

Metoda bazująca na fizjologii użytkownika ŚOI charakteryzuje się szeregiem ogólnych cech, które można opisać następująco. Model wymiany ciepła jest wieloparametrowy i wykorzystuje bilans ciepła dla ciała użytkownika. Transport masy (wilgoci) jest modelowany pośrednio, wyłącznie za pomocą niektórych współczynników w całym bilansie ciepła oraz mechanizmu pocenia się, czyli jako skutek utraty ciepła wraz z masą (wilgocią). Podstawowe ujęcie bilansowe jest opisane w szeregu znaczących publikacji, m.in. przez Agourram et al. [10], ISO 7933 [11]. Opis w tych źródłach jest uniwersalny, odnosi się do wszystkich organizmów dorosłych osób wykonujących prace fizyczne w określonych warunkach zewnętrznych, ubranych w odzież o zdefiniowanych parametrach. Bilans ciepła odnosi się do ciała użytkownika. Wpływ odzieży, jej konstrukcji i czynników otoczenia jest modelowany za pomocą odpowiednich zależności i współczynników w składnikach bilansu.

Bilans cieplny może posłużyć do analizy ilościowej lub jakościowej problemu. Analiza ilościowa polega na określeniu wielkości możliwych do wyznaczenia z bilansu ciepła, charakteryzujących aktualny stan fizjologiczny użytkownika. Analiza jakościowa polega wyłącznie na przyjęciu wyspecyfikowanych danych wejściowych i sprawdzeniu bilansu cieplnego pod kątem jego spełnienia. W tym celu należy ustalić wielkości wejściowe bilansu, uzyskane np. z pomiarów dla konkretnych warunków dla użytkownika. Następnie są one uwzględnione w równaniu bilansu ciepła dla określenia nadwyżki ciepła w organizmie. Jeśli jest ona równa zero, wówczas bilans jest spełniony. W pozostałych przypadkach nie zachodzi spełnienie bilansu, co może prowadzić do hipertermii lub hipotermii. Analiza ilościowa pozwala określić wielkości charakteryzujące fizjologię człowieka z wykorzystaniem ujęcia bilansowego i kolejnych przybliżeń w trakcie obliczeń. Należy wyselekcjonować parametry, które reprezentatywnie definiują stan fizjologiczny użytkownika. Następnie należy przyjąć wartości bazowe parametrów fizjologicznych i w kolejnych iteracjach można określić ich przyrosty w stosunku do wyjściowych, czyli ich zmienność w czasie. Obliczenia wykorzystują dwa kryteria: dopuszczalny wzrost temperatury ciała człowieka i dopuszczalną utratę płynów przez organizm. Wymiana ciepła jest rozpatrywana w układzie użytkownik – odzież – środowisko. Z uwagi na niemożliwe do określenia i efektywnego modelowania oddziaływania na styku użytkownik – odzież (zmienna powierzchnia podlegająca różnym rodzajom wymiany ciepła, trudne warunki opisu tych zjawisk, uproszczenia modelu) rozpatruje się jedynie układ odzież – środowisko.

Modelowanie oddziaływań człowiek – odzież następuje za pomocą parametrów izolacyjności odzieży.

Bilans cieplny umożliwia iteracyjne określenie temperatury rektalnej dla użytkownika odzieży o przyjętych parametrach. Dodatkowe związki empiryczne umożliwiają wówczas wyznaczenie przewidywanego wydatku potu oraz przewidywanej utraty ciepła przez parowanie. Mimo formalnego rozpatrywania wyłącznie bilansu ciepła, a nie sprzężonego przewodzenia ciepła i masy, jest to więc model uniwersalny, umożliwiający określenie pewnych parametrów wilgoci z wykorzystaniem bilansu ciepła.

### 1.2.2. Podstawowe sformułowanie bilansowe

Równanie bilansu cieplnego ujmuje szereg czynników wpływających na zachowanie równowagi cieplnej pomiędzy człowiekiem a otoczeniem, czyli między ciepłem endogennym (powstającym w organizmie w wyniku przemian komórkowych) a ciepłem egzogennym (uzyskiwanym z zewnątrz). Do czynników tych należą:

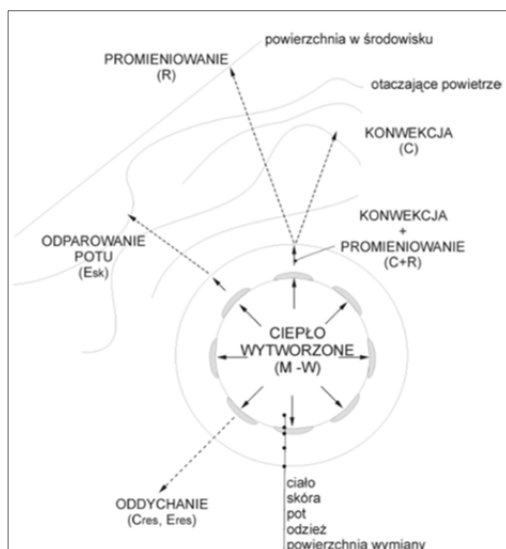
- wydatek energetyczny związany z intensywnością wykonywanej pracy,
- opór przewodzenia ciepła przez odzież,
- parametry powietrza (temperatura powietrza, średnia temperatura promieniowania, ciśnienie cząstkowe pary wodnej i prędkość powietrza).

Mają one wpływ na ilość ciepła odbieraną z organizmu przez otoczenie w celu zachowania homotermii (utrzymania temperatury wewnętrznej organizmu na poziomie  $37\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ ) [7]. Bilans ciepła użytkownika nieokrytego odzieżą w odniesieniu do powierzchni jednostkowej jego ciała można określić następująco:

$$\begin{aligned} \text{Ciepło dostarczane} &= \text{Ciepło tracone} \\ M &= W + K + C + R + E + C_{res} + E_{res} + S \end{aligned} \quad (1)$$

Wszystkie składniki w głównym równaniu bilansu są wyrażone w  $W\cdot m^{-2}$ ;  $M$  to wydatek metabolizmu,  $W$  – efektywna praca mechaniczna,  $S$  – nadwyżka ciepła w organizmie; pozostałe wielkości to gęstości strumienia utraty ciepła przez:  $K$  – przewodzenie ciepła z powierzchni skóry,  $C$  – konwekcję ciepła z powierzchni skóry,  $R$  – promieniowanie ciepła z powierzchni skóry,  $E$  – parowanie z powierzchni skóry,  $C_{res}$  – konwekcję w układzie oddechowym,  $E_{res}$  – promieniowanie w układzie oddechowym.

W przypadku gdy użytkownik nosi odzież, na jego bilans cieplny decydujący wpływ ma izolacyjność cieplna całkowita odzieży traktowanej jako układ zamknięty składający się z warstwy przyskórnej powietrza, materiału, z którego jest wykonana odzież i brzegowej warstwy powietrza przylegającej bezpośrednio do zewnętrznej warstwy odzieży. Proces wymiany ciepła zilustrowano na rysunku 2.



Rys. 2. Procesy wymiany ciepła pomiędzy organizmem a otoczeniem  
Źródło: [7].

Opis zjawisk fizycznych zachodzących podczas wymiany ciepła jest w tym przypadku bardziej skomplikowany, co zostanie wyjaśnione poniżej. Głównym celem dalszych rozważań będzie zdefiniowanie wpływu charakterystyk fizycznych odzieży na zachowanie bilansu cieplnego użytkownika.

### 1.2.3. Metabolizm

Ilość ciepła wytwarzanego wewnątrz ciała człowieka jest elementem obciążenia termicznego. Wyznaczanie jej jest zatem rzeczą istotną dla oceny obciążenia termicznego. Energia metaboliczna, która przedstawia ogólną ilość energii zużywanej wewnątrz ciała człowieka, jest dobrym miernikiem tego oszacowania dla większości warunków przemysłowych. Charakter wykonywanej pracy wpływa na wartość metabolicznej produkcji ciepła w organizmie i jest kluczowym elementem uwzględnianym zarówno przy doborze izolacyjności cieplnej odzieży, jak i parametrów powietrza w pomieszczeniu projektowanym czy ocenianym pod kątem komfortu. Wartość poziomu metabolizmu zależy od aktywności danej osoby, jej wieku, uwarunkowań genetycznych i zdrowotnych oraz warunków środowiska pracy. Poziom metabolizmu jest wyrażany w jednostkach *met* ( $1 \text{ met} = 58,2 \text{ W/m}^2$ ) i odpowiada metabolizmowi osoby w stanie spoczynku [12]. Tempo metabolizmu można wyznaczyć wykonując pomiar pochłaniania tlenu przez pracownika lub przez oszacowanie na podstawie tablic. Ze względu na charakter wskaźnika WBGT (Wet Bulb Globe Temperature), szacowanie tempa metabolizmu na podstawie tablic jest wystarczające. W przypadku braku możliwości oszacowania na podstawie tablic, klasyfikacja czynno-

ści może być ograniczona do pięciu głównych klas, tj.: spoczynku, małego tempa metabolizmu, umiarkowanego tempa metabolizmu, dużego tempa metabolizmu, bardzo dużego tempa metabolizmu [12]. Tabela 1 ułatwia taką klasyfikację. Podane wartości odnoszą się do czynności wykonywanych ciągle.

Tabela 1. Klasyfikacja poziomów tempa metabolizmu [12]

Klasa	Zakres tempa metabolizmu, $M$		Wartość stosowana przy obliczaniu średniego tempa metabolizmu		Przykłady
	w odniesieniu do jednostki powierzchni skóry	przy średniej powierzchni skóry, 1,8 m <sup>2</sup>	$W \cdot m^{-2}$	$W$	
<b>0</b> Spoczynek	$M < 65$	$M < 117$	65	117	Spoczynek
<b>1</b> Małe tempo metabolizmu	$65 < M < 130$	$117 < M < 234$	100	180	Swobodna pozycja siedząca: lekka praca ręczna (pisanie ręczne, pisanie na maszynie, rysowanie, szycie, księgowanie); praca rąk i ramion (małe narzędzia stolarskie, kontrola, montaż lub sortowanie lekkich materiałów); praca ramieniem i nogą (prowadzenie pojazdu w warunkach normalnych, obsługa przełącznika nożnego lub pedału). Pozycja stojąca: wiercenie (w małych częściach); frezowanie (małych części); nawijanie cewek; skręcanie drobnej armatury; praca z narzędziami o małej mocy; okresowe chodzenie (prędkość do 3,5 km/h).
<b>2</b> Umiarkowane tempo metabolizmu	$130 < M < 200$	$234 < M < 360$	165	297	Długotrwała praca dłońmi i ramieniem (wbijanie gwoździ, napelnianie); praca kończyną górną i dolną (jazda ciężarówką, traktorem lub sprzętem budowlanymi); praca ramieniem i tułowiem (praca narzędziami pneumatycznymi, łączenie ciągnika, tynkowanie, sporadyczne posługiwanie się umiarkowanie ciężkimi materiałami, pielenie, gracowanie, zbieranie owoców lub warzyw); pchanie lub ciągnięcie lekkich wózków lub taczek; chodzenie z prędkością od 3,5 km/h do 5,5 km/h; kucie mechaniczne.

3 Duże tempo metabolizmu	$200 < M < 260$	$360 < M < 468$	230	414	Intensywna praca ramieniem i tułowiem: przenoszenie ciężkich materiałów; szufłowanie; kucie ręczne; piłowanie, struganie lub rzeźbienie twardego drewna; ręczne koszenie; kopanie, chodzenie z prędkością od $5,5 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ do $7 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ . Pchanie lub ciągnięcie mocno obciążonych wózków ręcznych lub taczek; wyjmowanie odlewów z formy; układanie bloków betonowych.
4 Bardzo duże tempo metabolizmu	$M > 260$	$M > 468$	290	522	Bardzo intensywna praca wykonywana w tempie szybkim do maksymalnego; praca siekierą; intensywne szufłowanie lub kopanie; wchodzenie po schodach, pochylni lub drabinie; szybkie chodzenie małymi krokami, chodzenie z prędkością większą niż $7 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ .

Metabolizm można określić doświadczalnie jako wydatek energetyczny, konieczny dla wykonania danego rodzaju pracy, patrz ISO 8996 [9]. Jest on możliwy do stabilizowania w funkcji aktywności fizycznej, w odniesieniu do średniej pracy wykonanej w ciągu 60 minut (tabela 1). Można go też określić w funkcji wyspecyfikowanych czynności zgodnie z danymi zawartymi w tabelach 2 i 3.

Tabela 2. Wydatek metabolizmu dla różnych aktywności wyznaczony jako wartość średnia dla 60 min ciągłej pracy według ISO 7933 [11]

Rodzaj aktywności	Wydatek $M$ , $Wm^{-2}$	Opis/przykład pracy
Odpoczynek	40-70	Sen, brak wysiłku fizycznego, bez względu na pozycję (siedząca lub stojąca).
Bardzo mała	90-100	Praca z niewielkim wysiłkiem: wykonywana za pomocą dłoni (pisanie ręczne lub maszynowe, rysowanie), lekka praca ręczna (drobne prace warsztatowe, czynności kontrolne, proste prace wykonawcze).
Mała	110-120	Praca wykonywana za pomocą ramion (prowadzenie samochodu), sterowniki nożne – praca stóp przy włącznikach i pedałach, prace maszynowe wymagające małego wysiłku, prace wymagające nieznacznego chodzenia, chód z prędkością (2-3 km/h).
Średnia – duża	130-150	Praca umiarkowana wykonywana za pomocą ramion i tułowia, prace narzędziowe (młot jednoręczny, młot pneumatyczny, prowadzenie ciągnika rolniczego, pcha-

		nie lub ciągnięcie lekkich wózków lub taczek), chód z prędkością (4-5 km/h).
Duża	190-210	Praca intensywna wykonywana za pomocą ramion i tułowia (przenoszenie ciężarów, łopata, młot dwuręczny, ścinanie drzew piłą łańcuchową, koszenie ręczne, kopanie), szybki chód z prędkością (5-6 km·h <sup>-1</sup> ), pchanie lub ciągnięcie ciężkich wózków lub taczek, obróbka odlewów, układanie ciężkich elementów.
Bardzo duża	> 230	Bardzo intensywna praca w tempie bliskim maksymalnemu (siekiera, intensywna praca łopatą lub kopanie), wchodzenie po schodach, pochylni lub drabinie, szybki chód małymi krokami, bieg, szybki chód z prędkością ponad 6 km·h <sup>-1</sup> , chód w głębokim syrkim śniegu.

Tabela 3. Wydatek metabolizmu w zależności od czynności według ISO 7933 [11]

Rodzaj aktywności	Wydatek $M, W \cdot m^{-2}$
Całkowity odpoczynek w pozycji leżącej	40
Odpoczynek w pozycji siedzącej	55
Odpoczynek w pozycji stojącej	70
Chód w poziomie, odcinek prosty, nawierzchnia utwardzona:	
– bez obciążenia, prędkość (2-3) km·h <sup>-1</sup>	110-140
– bez obciążenia, prędkość (4-5) km·h <sup>-1</sup>	165-200
– z obciążeniem (10-30) kg, prędkość 4 km/h	185-250
Chód pod górę, odcinek prosty, nawierzchnia utwardzona:	
– bez obciążenia, nachylenie (5-15)°, prędkość (3-4) km·h <sup>-1</sup>	180-210
– bez obciążenia, nachylenie 25°, prędkość 3 km·h <sup>-1</sup>	300
– z obciążeniem 20 kg, nachylenie (15-25)°, prędkość km·h <sup>-1</sup>	270-410
Chód w dół, odcinek prosty, nawierzchnia utwardzona:	
– bez obciążenia, nachylenie (5-15)°, prędkość 5 km·h <sup>-1</sup>	135-180
Drabina pod kątem nachylenia 70° do poziomu:	
– bez obciążenia	290
– z obciążeniem 20 kg	360
Ładunek (12-16) kg na kołach, odcinek prosty, nawierzchnia utwardzona, prędkość (3-4) km·h <sup>-1</sup> :	
– pchanie 12 kg	290
– ciągnięcie 16 kg	375
Pchanie ładunku 100 kg na kołach (taczki), koła elastyczne, prędkość (4-5) km·h <sup>-1</sup>	230
Ręczna obróbka skrawaniem (42-60) <i>cykli·min<sup>-1</sup></i>	100-190
Cięcie piłą ręczną	220
Cięcie piłą maszynową	100
Praca młotem dwuręcznym, waga 4,4 kg, 15 <i>uderzeń·min<sup>-1</sup></i>	290
Wkręcanie (śruby, wkręty)	290
Kopanie rowu	290-300
Praca na obrabiarce	
– lekka i średnia (regulacja nastaw maszyny, montaż części)	100-140
– ciężka (obróbka, wymiana części, noszenie)	210



#### 1.2.4. Efektywna praca mechaniczna

Przyjęta zasada bilansu zakłada, że nie ma innych źródeł energii i cała praca wykonana przez człowieka jest pokrywana za pomocą wydatku metabolizmu. Niezrównoważenie tego wydatku może wywołać negatywne skutki dla organizmu, tj. hiper- lub hipotermię. Standardowo zakłada się w programie wartość pracy mechanicznej równą zero. Jeśli występuje dodatkowa, niezrównoważona praca fizyczna, to przyjmuje ona niewielką wartość. Jedyne w przypadku wystąpienia ewidentnego zakłócenia bilansu można wprowadzić jej znacznie większą wartość. Modeluje się ją przez założenie konkretnej bezwzględnej wartości wyrażonej w  $W \cdot m^{-2}$  lub jako udziału procentowego wydatku metabolizmu.

#### 1.2.5. Przepływ ciepła przez przewodzenie

Ten rodzaj wymiany ciepła nie jest określany w bilansie sformułowanym zgodnie z ISO 7933. Wykorzystany jest fakt, że użytkownik w ubiorze stanowi zamknięty układ. Warunek przewodzenia to kontakt człowieka z ubiorem, a jest to wtedy oddziaływanie wewnętrzne. Dlatego utrata ciepła przez przewodzenie z układu zamkniętego występuje tylko wówczas, gdy ubiór styka się z jakimś elementem zewnętrznym, przedmiotem itp. Najczęściej nie ma takiej sytuacji, poza stykiem ciała z ewentualnym narzędziem pracy, torbą, elementem konstrukcji itp. Powierzchnia styku jest jednak minimalna w stosunku do całej powierzchni i można ją pominąć. W zapisie ogólnym gęstość strumienia utraty ciepła przez przewodzenie zachodzące w ubiorze można wyrazić jako funkcję różnicy temperatur w następujący sposób, patrz ISO 7933 [11]:

$$K = h_{k_{dyn}}(T_{sk} - T_a)F_{cl}. \quad (2)$$

Powyższa zależność jest funkcją:  $T_a$  – temperatury otaczającego powietrza mierzonej w  $^{\circ}C$ ,  $T_{sk}$  – temperatury skóry mierzonej w  $^{\circ}C$ ,  $h_{k_{dyn}}$  – dynamicznego współczynnika przewodzenia ciepła odzieży o jednostce  $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$  wyznaczonego podczas ruchu człowieka i powietrza,  $F_{cl}$  – bezwymiarowego współczynnika okrycia ciała, który jest definiowany jako iloraz zewnętrznej powierzchni ciała w ubiorze do całkowitej powierzchni ciała bez ubioru. Zgodnie z PN-EN ISO 9920 [8] współczynnik ten może być większy od jedności, ponieważ całkowita powierzchnia ciała ubranej osoby jest większa od powierzchni ciała użytkownika bez ubioru.

#### 1.2.6. Przepływ ciepła w ubiorze przez konwekcję

Wymiana ciepła przez konwekcję dotyczy wyłącznie części powierzchni odzieży poddanej temu zjawisku. Jest to funkcja opisana różnicą temperatur odzieży i otoczenia. Matematycznie gęstość strumienia utraty ciepła przez konwekcję można określić w postaci [11]:

$$C = h_{cdyn}(T_{sk} - T_a)F_{cl}. \quad (3)$$

Powyższy związek to funkcja:  $T_a$  – temperatury otaczającego czynnika (powietrza) mierzonej w  $^{\circ}C$ ,  $T_{sk}$  – temperatury skóry mierzonej w  $^{\circ}C$ ,  $h_{cdyn}$  – dynamicznego współczynnika konwekcji odzieży wyrażonego w  $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ , wyznaczonego podczas ruchu człowieka i powietrza  $F_{cl}$  – współczynnika okrycia ciała, który jest definiowany jako iloraz zewnętrznej powierzchni ciała w ubiorze do całkowitej powierzchni ciała bez ubioru. Dynamiczny współczynnik konwekcji  $h_{cdyn}$  może zależeć od różnicy temperatur lub prędkości względnej powietrza na powierzchni odzieży. W zależności od zachodzących zjawisk jest przyjmowany jako największa z trzech wartości [13] podanych poniżej:

$$h_{cdyn} = \max \left\{ 2,38 |T_{sk} - T_a|^{0,25}; \quad 3,5 + 5,2v_{ar}; \quad 8,7v_{ar}^{0,6} \right\}, \quad (4)$$

gdzie  $v_{ar}$  to względna prędkość powietrza określona w  $m \cdot s^{-1}$ . Bezwymiarowy współczynnik okrycia ciała  $F_{cl}$  może być stabilizowany dla najbardziej typowych rodzajów odzieży, patrz np. Agourram et al. [10]. Alternatywnie może być też określony za pomocą zależności empirycznej [14, 9] w postaci:

$$F_{cl} = 1 + 1,97I_{cl\ st}, \quad (5)$$

gdzie  $I_{cl\ st} = 0,155 I_{cl}$  to statyczna podstawowa izolacja cieplna odzieży, rozumiana jako izolacja warstwy przyskórnej powietrza wraz z materiałem, z jakiego wykonana jest odzież określona w  $m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$ , jeżeli  $I_{cl}$  wyrażono w  $clo$  (przyjmując, iż  $1\ clo = 0,155\ m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$ ), określona przy braku ruchu człowieka i powietrza (za brak ruchu powietrza przyjmuje się jego prędkość przyjmującą wartość  $< 0,2\ ms^{-1}$ ). Inny wzór jest przytoczony w normie ISO 9920:2007 E [8] w postaci:

$$F_{cl} = 1 + 1,81I_{cl\ st}. \quad (6)$$

Wartość statycznej podstawowej izolacyjności cieplnej ubioru  $I_{cl\ st}$  określa się ze wzoru:

$$I_{cl\ st} = \frac{T_{sk} - T_{cl}}{H}, \quad (7)$$

gdzie:  $T_{sk}$  jest średnią temperaturą powierzchni skóry podaną w  $^{\circ}C$ ,  $T_{cl}$  – średnią zewnętrzną temperaturą powierzchni odzieży podaną w  $^{\circ}C$ ,  $H$  – ubytkiem suchego strumienia ciepła odniesionego do powierzchni skóry wyrażonym w  $W \cdot m^{-2}$ . Podstawowe rodzaje odzieży są scharakteryzowane pod względem izolacji cieplnej w tabeli 4.

Tabela 4. Wartości podstawowej izolacji cieplnej dla wybranych zestawień ubrań według PN-EN ISO 7933 [11]

Rodzaj ubioru	Opis	$I_{cl}, clo$
Lekki	Majtki, koszula z krótkim rękawem, dopasowane spodnie, skarpety, buty	0,5
Lekki	Kalesony, koszula, dopasowane spodnie, skarpety, buty	0,6
Średni	Kalesony, kombinezon, skarpety, buty	0,7
Średni	Kalesony, koszula, spodnie, bluza, skarpety, buty	0,8
Średni	Kalesony, koszula, kombinezon, skarpety, buty	0,9
Ciężki	Majtki, podkoszulek, kalesony, koszula, bluza, skarpety, buty	1,0
Ciężki	Kalesony, podkoszulek, koszula, spodnie, kurtka, kamizelka, skarpety, buty	1,1

Z uwagi na dopasowanie można założyć proporcjonalność powierzchni odzieży do powierzchni ciała. Dlatego powierzchnia danej części ubioru poddanej promieniowaniu cieplnemu jest możliwa do wyznaczenia dzięki udziałom poszczególnych części ciała w stosunku do całej powierzchni (tabela 5).

Tabela 5. Udział poszczególnych części ciała w stosunku do całej powierzchni według ISO 7933 [11]

Część ciała	Udział procentowy
Głowa	0,070
Przednia część tułowia	0,175
Plecy	0,175
Ramiona	0,140
Ręce	0,050
Biodra	0,190
Nogi	0,130
Stopy	0,070

Całkowita wartość powierzchni skóry człowieka została zestawiona według różnych źródeł w tabeli 6.

Tabela 6. Całkowita powierzchnia ciała człowieka według [15]

Źródło bibliograficzne	Wartość, $m^2$
Charity, Mitchell N. Your enormous surface area... A View from the Back of the Envelope. Vendian Systems, 1999	2
Bender, Arnold E. & David A. Bender. Body Surface Area. A Dictionary of Food and Nutrition. New York: Oxford University Press, 1995	1,6-1,8
Davis, F.A. Tabler's Cyclopedic Medical Dictionary. F.A. Davis Company, 1993	1,8
M.J. Farabee. Integumentary System. Estrella Mountain Community College, 1992-2000	1-2
Environmental Research Foundation. Dangers of Dioxin Exposures: Absorption Through the Skin. RACHEL's Hazardous Waste Newsletter. No. 120 (RACHEL = Remote Access Chemical Hazards Electronic Library)	1,8

Alternatywnie całkowitą powierzchnię ciała można określić za pomocą różnych związków empirycznych (tabela 7).

Tabela 7. Związki empiryczne opisujące sposoby określania całkowitej powierzchni ciała ludzkiego

Autor/rok	Sposób obliczania
Mosteller [15]	$(\text{wysokość, cm} \cdot \text{waga, kg}/3600)^{0,5}$
Haycock, Schwartz, Wisotsky [16]	$0,024265 \cdot (\text{wysokość, cm})^{0,3964} \cdot (\text{waga, kg})^{0,5378}$
Gehan & George [17]	$0,0235 \cdot (\text{wysokość, cm})^{0,42246} \cdot (\text{waga, kg})^{0,51456}$
Boyd [18]	$0,0003207 \cdot (\text{wysokość, cm})^{0,3} \cdot (\text{waga, g})^{(0,7285 \cdot 0,0188 \cdot \log(\text{waga, g}))}$
DuBois & DuBois [19]	$0,20247 \cdot (\text{wysokość, m})^{0,725} \cdot (\text{waga, kg})^{0,425}$

Załóżmy dalej, że dla dorosłego człowieka udziały powierzchni promieniowania/konwekcji odzieży wynoszą odpowiednio 0,67 całkowitej powierzchni ciała dla człowieka w przysiadzie; 0,70 – siedzącego i 0,77 – stojącego.

### 1.2.7. Utrata ciepła przez promieniowanie ubioru

Utrata ciepła przez promieniowanie dotyczy części powierzchni odzieży poddanej temu zjawisku. Jest to funkcja opisana różnicą temperatur odzieży i otoczenia, natomiast zgodnie z klasycznym warunkiem promieniowania jest to funkcja różnic czwartych potęg temperatury powierzchni ubioru i otoczenia [10, 11].

$$R = F_{cl} h_r (T_{sk} - T_r) = \sigma \varepsilon_{sk} \frac{A_r}{A_{Du}} \left[ (T_{sk} + 273)^4 - (T_r + 273)^4 \right] F_{cl}. \quad (8)$$

Jest to funkcja następujących składników:  $T_r$  – średniej temperatury promieniowania mierzonej w °C termometrem kulistym wg normy ISO 7726 [13],  $T_{sk}$  – temperatury skóry mierzonej w °C,  $h_r$  – współczynnika radiacyjnej wymiany ciepła określonego w  $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$  wyznaczanego podczas ruchu człowieka i powietrza,  $F_{cl}$  – bezwymiarowego współczynnika okrycia ciała, który jest definiowany jako iloraz zewnętrznej powierzchni ciała w ubiorze do całkowitej powierzchni ciała bez ubioru, stałej Stefana-Boltzmannna  $\sigma$ , wynoszącej  $5,67 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ , emisyjności skóry  $\varepsilon_{sk}$ , wynoszącej 0,97;  $A_r/A_{Du}$  – bezwymiarowego stosunku promieniującej powierzchni odzieży do całkowitej powierzchni skóry  $A_{Du}$  według DuBois [19], który wynosi jak dla konwekcji: 0,67 całkowitej powierzchni ciała dla człowieka w przysiadzie; 0,70 dla siedzącego i 0,77 dla stojącego.

### 1.2.8. Sucha wymiana ciepła realizowana przez ubiór

Sucha wymiana ciepła realizowana przez ubiór jest to wymiana ciepła bez wilgoci (potu), która zachodzi przez konwekcję i promieniowanie między zewnętrzną powierzchnią odzieży i otoczeniem podczas ruchu człowieka i powietrza. Można ją zapisać następującą matematyczną zależnością, z wykorzystaniem wzorów (3) i (8):

$$C + R = h_{c \text{ dyn}}(T_{cl} - T_a)F_{cl} + h_r(T_{cl} - T_r)F_{cl}. \quad (9)$$

Z kolei biorąc pod uwagę suchą wymianę ciepła między skórą użytkownika a wewnętrzną powierzchnią odzieży, można napisać zależność:

$$C + R = \frac{T_{sk} - T_{cl}}{I_{cl \text{ dyn}}}, \quad (10)$$

gdzie  $I_{cl \text{ dyn}}$  to dynamiczna izolacja cieplna odzieży rozumiana jako izolacyjność cieplna warstwy przyskórnej powietrza i materiału z jakiego wykonano odzież podczas ruchu człowieka i powietrza [11]. Porównując stronami zależności (9) i (10), można określić nieznaną parametr – temperaturę odzieży  $T_{cl}$  w funkcji zadanych warunków na powierzchni skóry, rodzaju odzieży i warunków otoczenia. Jest on postaci przedstawionej poniżej:

$$T_{cl} = \frac{\frac{T_{sk}}{I_{cl \text{ dyn}}} + F_{cl}(h_{c \text{ dyn}}T_a + h_rT_r)}{\frac{1}{I_{cl \text{ dyn}}} + F_{cl}(h_{c \text{ dyn}} + h_r)}. \quad (11)$$

Temperatura skóry może zostać określona za pomocą wzorów empirycznych. Jeśli rozważa się człowieka bez odzieży, za taki stan przyjmuje się odzież opisaną przez statyczną całkowitą izolację cieplną  $I_{cl} \leq 0,2 \text{ clo}$ , wówczas średnia temperatura skóry dla stanu ustalonego  $T_{sk,eq \text{ nu}}$  jest zapisana związkiem:

$$T_{sk,eq \text{ nu}} = 7,191 + 0,064T_a + 0,061T_r - 0,348v_a + 0,198p_a + 0,000M + 0,616T_{re}, \quad (12)$$

gdzie poza wprowadzonymi oznaczeniami,  $v_a$  to prędkość powietrza w  $m \cdot s^{-1}$ ,  $p_a$  – cząstkowe ciśnienie pary wodnej w  $kPa$ ,  $T_{re}$  – temperatura rektalna w  $^{\circ}C$ ,  $M$  – wartość metabolizmu [20-23]. Dla człowieka w pełnym ubiorze, za taki stan przyjmuje się odzież opisaną przez statyczną całkowitą izolację cieplną  $I_{cl} \geq 0,6 \text{ clo}$  [20-23], średnia temperatura skóry człowieka ubranego dla stanu ustalonego  $T_{sk,eq \text{ cl}}$  jest zapisana związkiem:

$$T_{sk,eq \text{ cl}} = 12,165 + 0,02017T_a + 0,04361T_r - 0,25315v_a + 0,19354p_a + 0,005346M + 0,51274T_{re}. \quad (13)$$

Dla wartości pośrednich  $0,2 clo \leq I_{cl} \leq 0,6 clo$  [20] średnia temperatura skóry dla stanu ustalonego jest aproksymowana za pomocą zależności:

$$T_{sk,eq nu} = 7,191 + 0,064 T_a + 0,061 T_r - 0,348 v_a + 0,198 p_a + 0,000M + 0,616 T_{re}. \quad (14)$$

Współczynnik radiacyjnej wymiany ciepła może być wyznaczony za pomocą związku przedstawionego w pracach [10, 23] w postaci:

$$h_r = 5,67 \cdot 10^{-8} \varepsilon \frac{A_r}{A_{Du}} \frac{(T_{cl} + 273)^4 - (T_r + 273)^4}{(T_{cl} - T_r)}. \quad (15)$$

Udział powierzchni promieniowania odzieży do powierzchni całkowitej ciała  $A_r/A_{Du}$  wynosi jak dla konwekcji 0,67 całkowitej powierzchni ciała dla człowieka w przysiadzie; 0,70 siedzącego i 0,77 stojącego. Jeśli człowiek znajduje się w ubiorze odbijającym (refleksyjnym), wówczas współczynnik radiacyjnej wymiany ciepła musi zostać skorygowany za pomocą zależności:

$$h_{r,R} = F_{cl,R} h_r. \quad (16)$$

Bezwymiarowy współczynnik radiacyjnej wymiany ciepła spowodowany ubiorem  $F_{cl,R}$  można określić posługując się związkiem przedstawionym w pracy [20] w postaci:

$$F_{cl,R} = 0,97 \cdot (1 - A_R) + A_R \cdot F_R. \quad (17)$$

W zależności (17) symbol  $A_R$  to udział powierzchni ciała pokrytej odzieżą odbijającą promieniowanie. Emisyjność odzieży odbijającej (refleksyjnej) jest opisana w tabeli 8.

Tabela 8. Współczynniki emisyjności  $F_R$  dla różnych materiałów na bazie aluminium według ISO 7933 [11]

Obróbka	Materiał	Współczynnik $F_R$
Aluminiowanie	Bawełna	0,42
	Wiskoza	0,19
Pociągnięcie odblaskową folią aluminiowaną	Aramid (Kevlar)	0,14
	Włna	0,12
	Bawełna	0,04
	Włókno szklane	0,07
Próżniowe metalizowanie aluminium	Wiskoza	0,06
	Aramid	0,05
	Włna	0,05
	Bawełna	0,05

Dynamiczna, określona podczas ruchu człowieka, podstawowa izolacja cieplna odzieży  $I_{cl dyn}$  może zostać zapisana zależnością:

$$I_{cl\ dyn} = I_{tot\ dyn} - \frac{I_{a\ dyn}}{F_{cl}}, \quad (18)$$

gdzie  $I_{tot\ dyn}$  to całkowita dynamiczna izolacja cieplna odzieży zapisana w  $m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$ ,  $I_{a\ dyn}$  – dynamiczna izolacja cieplna warstwy brzegowej powietrza również wyrażona w  $m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$  [10,11]. Całkowita dynamiczna izolacja cieplna odzieży może zostać określona związkami:

$$I_{tot\ dyn} = C_{orr,tot} \cdot I_{tot\ st}, \quad (19)$$

gdzie  $C_{orr,tot}$  oznacza bezwymiarowy współczynnik korekcyjny dla obliczenia izolacji dynamicznej odzieży,  $I_{tot\ st}$  to całkowita statyczna izolacja cieplna odzieży wyrażona w  $m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$  [11]. Odpowiednio dynamiczna izolacja cieplna warstwy brzegowej jest opisana związkami:

$$I_{a\ dyn} = C_{orr,la} \cdot I_{a\ st}, \quad (20)$$

gdzie  $C_{orr,la}$  oznacza bezwymiarowy dynamiczny współczynnik korekcyjny dla obliczenia izolacji dynamicznej warstwy brzegowej powietrza,  $I_{a\ st}$  to całkowita statyczna izolacja cieplna warstwy brzegowej powietrza zapisana w  $m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$  [11]. Odpowiednio dla człowieka bez odzieży można przyjąć  $I_{a\ st} = 0,111 m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$ . Z kolei całkowita statyczna izolacja cieplna odzieży jest opisana następująco [24]:

$$I_{tot\ st} = I_{cl\ st} + \frac{I_{a\ st}}{F_{cl}}. \quad (21)$$

Współczynnik korekcyjny izolacji dynamicznej odzieży  $C_{orr,tot}$  to funkcja aktualnych warunków zewnętrznych dotyczących odzieży, czyli prędkości powietrza i prędkości chodu. Dla człowieka w pełnym ubiorze (za taki stan przyjmuje się ubiór opisany przez statyczną podstawową izolację cieplną  $I_{cl} \geq 0,6 clo$ ) współczynnik ten wyraża się różnymi zależnościami empirycznymi w zależności od źródła, patrz PN-EN 9920 [8]. Do dalszych obliczeń został przyjęty związek określony w normie PN-EN ISO 7933 [11]:

$$C_{orr,tot} = C_{orr,cl} = e^{(0,043 - 0,398v_{ar} + 0,066v_{ar}^2 - 0,378v_w + 0,094v_w^2)}. \quad (22)$$

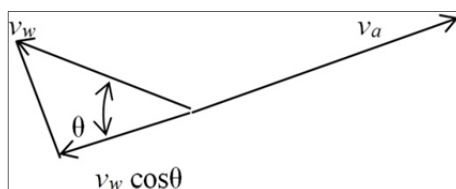
W powyższym związku  $v_{ar}$  oznacza względną prędkość powietrza w  $m \cdot s^{-1}$ ; zaś  $v_w$  to prędkość chodu, również w  $m \cdot s^{-1}$ . Jeśli rozważa się człowieka bez odzieży (za taki stan przyjmuje się odzież opisaną przez statyczną izolację cieplną  $I_{cl} \leq 0,2 clo$ ), wówczas współczynnik ten może być wyrażony w postaci przedstawionej w pracy [21]. Podobnie jak poprzednio, wobec różnych postaci współczynnika, przyjmuje się do dalszych obliczeń zależność zdefiniowaną według PN-EN ISO 7933 [11]:

$$C_{orr,la} = e^{(-0,472v_{ar}+0,047v_{ar}^2-0,342v_w+0,117v_w^2)} \quad (23)$$

Dla przypadku pośredniej wartości podstawowej, statycznej izolacji cieplnej odzieży zawartej w granicach  $0,2 \text{ clo} \leq I_{cl} \leq 0,6 \text{ clo}$  powyższy współczynnik można aproksymować następującym związkiem wg [11]:

$$C_{orr,tot} = (0,6 - I_{cl}) \cdot C_{orr,la} + I_{cl} \cdot C_{orr,cl} \quad (24)$$

Współczynniki  $C_{orr,la}$  i  $C_{orr,cl}$  występujące w związku (24) zostały przedstawione odpowiednio zależnościami (22) i (23). Prędkości są przy tym ograniczone do zakresów  $v_a < 3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  oraz  $v_w < 1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Należy przy tym pamiętać, że wektory prędkości chodu (ruchu człowieka) i powietrza mogą mieć różne kierunki i zwroty. Może zaistnieć sytuacja, że podczas ruchu użytkownika odzieży wektory prędkości powietrza i chodu nie mają takiego samego kierunku (rysunek 3).



Rys. 3. Wyznaczanie prędkości względnej w ruchu jednokierunkowym

Źródło: opracowanie własne.

W takim przypadku konieczne jest wyznaczenie prędkości względnej ruchu powietrza i chodu. Najczęściej prędkość powietrza jest większa niż prędkość ruchu. Stąd rzutujemy prędkość chodu na kierunek prędkości powietrza z uwzględnieniem kąta rozkładu  $\theta$ , otrzymując zależność prędkości względnej ruchu w postaci:

$$v_{ar} = \left| v_a - v_w \cos \frac{\pi\theta}{180} \right| \quad (25)$$

Kąt  $\theta$  jest przy tym wyrażony w  $[\circ]$ , stąd konieczność przeliczenia na miarę łukową (radiany). W przypadku ruchu z prędkościami o zmiennych kierunkach przyjmuje się związki zdefiniowane w pracy [21] w postaci:

$$\begin{aligned} \text{jeśli } v_a < v_w \text{ to } v_{ar} &= v_w, \\ \text{jeśli } v_a \geq v_w \text{ to } v_{ar} &= v_a. \end{aligned} \quad (26)$$



Jeśli mamy do czynienia z prędkością o nieokreślonej wartości lub użytkownik pozostaje w spoczynku, to prędkość chodu dla zakresu  $v_w < 0,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  wyraża związek empiryczny przedstawiony w pracy [21] w postaci:

$$v_{ar} = 0,0052(M - 58). \quad (27)$$

Dla prędkości chodu  $v_w \geq 0,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  uwzględniana jest rzeczywista wartość tej prędkości.

### 1.2.9. Utrata ciepła przez parowanie na powierzchni skóry

Utrata ciepła przez parowanie to tzw. mokra wymiana ciepła, ponieważ jako jedyna jest sprzężona, czyli połączona z transportem ciepła i masy (wilgoci). Zachodzi dla całej powierzchni skóry. Maksymalna gęstość strumienia utraty ciepła przez parowanie z powierzchni skóry  $E_{max}$  jest określona związkiem:

$$E_{max} = \frac{p_{sk,s} - p_a}{R_{tdyn}}, \quad (28)$$

gdzie  $p_{sk,s}$  to ciśnienie nasyconej pary wodnej w temperaturze skóry wyrażone w  $kPa$ ,  $p_a$  oznacza cząstkowe ciśnienie pary wodnej w  $kPa$ ,  $R_{tdyn}$  to całkowity dynamiczny opór pary wodnej ubioru oraz warstwy brzegowej powietrza w  $m^2 kPa \text{ W}^{-1}$  [10, 11]. Całkowity dynamiczny (wynikowy) opór pary wodnej dla ubioru oraz warstwy brzegowej powietrza można określić z następującego równania przedstawionego w pracy [21]:

$$R_{tdyn} = 16,7 \frac{I_{tot dyn}}{i_{mdyn}}. \quad (29)$$

W powyższym związku  $i_{mdyn}$  określa dynamiczny współczynnik przenikania wilgoci w postaci pary wodnej, wielkość bezwymiarową, który można opisać zależnością zdefiniowaną w pracy [21] w postaci:

$$i_{mdyn} = C_{orr,E} \cdot i_{mst}, \quad (30)$$

gdzie  $C_{orr,E}$  to współczynnik korekty dynamicznego wskaźnika przepuszczalności wilgoci odzieży, zaś  $i_{mst}$  oznacza statyczny wskaźnik przepuszczalności wilgoci odzieży, wielkość bezwymiarową. Współczynnik  $C_{orr,E}$  jest zapisany w pracy [21] związkiem empirycznym w postaci:

$$C_{orr,E} = 2,6 \cdot C_{orr,tot}^2 - 6,5 \cdot C_{orr,tot} + 4,9. \quad (31)$$

Odpowiednio statyczny wskaźnik przepuszczalności wilgoci odzieży  $i_{mst}$  może przyjmować w powyższych zależnościach wartości  $i_{mst} \leq 0,9$ . W przypadku

gdy skóra jest tylko częściowo wilgotna, gęstość strumienia utraty ciepła przez parowanie jest określana zgodnie z (28) następująco:

$$E = wE_{\max} = w \frac{P_{sk,s} - P_a}{R_{dyn}}, \quad (32)$$

gdzie  $w$  to poziom wilgoci w skórze [20, 21].

### 1.2.10. Utrata ciepła przez konwekcję w układzie oddechowym

Gęstość strumienia utraty ciepła przez konwekcję w układzie oddechowym może być zdefiniowana za pomocą różnych zależności empirycznych. Pierwsza z nich wiąże tę wielkość z wydatkiem oddechowym powietrza w płucach i różnicą temperatur powietrza w płucach i otoczeniu. Można w tym przypadku zapisać [10, 20]:

$$C_{res} = 0,072c_p V \frac{T_{ex} - T_a}{A_{Du}}. \quad (33)$$

W powyższej zależności wprowadzono następujące oznaczenia:  $c_p$  – ciepło właściwe suchego powietrza przy stałym ciśnieniu wyrażone w  $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ,  $V$  – wydatek oddechowy powietrza w płucach w  $l \cdot min^{-1}$ ,  $T_{ex}$  – temperatura wydychanego powietrza w  $^{\circ}C$ ,  $T_a$  – temperatura otaczającego powietrza w  $^{\circ}C$ ,  $A_{Du}$  – powierzchnia ciała człowieka obliczona według metodyki Du Bois w  $m^2$ . Inny wzór empiryczny określający konwekcyjną gęstość strumienia utraty ciepła w układzie oddechowym to funkcja metabolizmu, temperatury i ciśnienia powietrza w otoczeniu w postaci:

$$C_{res} = 0,00152M(28,56 - 0,885T_a + 0,641p_a), \quad (34)$$

gdzie  $M$  to wydatek metabolizmu organizmu w  $W \cdot m^{-2}$ ,  $p_a$  – ciśnienie cząstkowe pary wodnej wyrażone w  $kPa$  [20, 21].

### 1.2.11. Utrata ciepła przez parowanie w układzie oddechowym

Utrata ciepła przez parowanie w układzie oddechowym może być zdefiniowana za pomocą zależności empirycznych, analogicznie do utraty ciepła przez konwekcję. Pierwszy związek ma postać:

$$E_{res} = 0,072c_e V \frac{w_{ex} - w_a}{A_{Du}}. \quad (35)$$

W powyższej zależności wprowadzono następujące oznaczenia:  $c_e$  – ciepło przemiany fazowej parowania wyrażone w  $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ,  $w_{ex}$  – współczynnik wilgotności wydychanego powietrza w  $(kg \text{ wody})(kg \text{ suchego powietrza})^{-1}$ ,

$w_a$  – współczynnik wilgotności otaczającego powietrza w  $(kg\ wody)/(kg\ suchego\ powietrza)^{-1}$  [10, 20]. Kolejna zależność opisuje parowanie w układzie oddechowym jako funkcję metabolizmu, temperatury i ciśnienia powietrza w otoczeniu [20, 21], w następującej postaci:

$$E_{res} = 0,00127M(59,34 + 0,53T_a - 11,63p_a). \quad (36)$$

### 1.3. Analiza jakościowa bilansu cieplnego

Jak opisano poprzednio, analiza jakościowa polega wyłącznie na przyjęciu określonych danych wejściowych i sprawdzeniu bilansu cieplnego. Jedyne kryterium to fakt spełnienia lub niespełnienia bilansu cieplnego. Nie przeprowadza się oceny ilościowej, czyli nie określa się ile wynosi nadwyżka ciepła w organizmie  $S$ . Zestawienie danych wejściowych jest podane w tabeli 9. Określenie bilansu cieplnego dla człowieka ubranego wymaga określenia składników zależności (1) uwzględniających izolacyjność cieplną ubioru. Nadwyżkę ciepła w organizmie  $S$  można wyznaczyć przekształcając ten związek do następującej postaci:

$$S = M - (W + C + R + E + C_{res} + E_{res}). \quad (37)$$

Tabela 9. Dane wejściowe do obliczeń analizy jakościowej bilansu cieplnego

Lp.	Dane wejściowe	Symbol	Jednostka
1	Temperatura powietrza	$T_a$	$^{\circ}C$
2	Średnia temperatura promieniowania	$T_r$	$^{\circ}C$
3	Ciśnienie cząstkowe pary wodnej	$p_a$	$kPa$
4	Prędkość powietrza	$v_a$	$m \cdot s^{-1}$
5	Ubiór pełny ( $I_{cl} > 0,6clo$ )	$I_{cl}$	$clo$
6	Temperatura rektalna	$T_{re}$	$^{\circ}C$
7	Temperatura ubioru	$T_{cl}$	$^{\circ}C$

W zależności od wartości ciepła dostarczanego (wydatek metabolizmu) oraz traconego różnymi sposobami występuje równowaga termiczna lub jej brak. Stan organizmu może być opisany za pomocą nadwyżki ciepła  $S$ . Sekwencja obliczeń jest podana w tabeli 10.

Tabela 10. Sekwencja obliczeń analizy jakościowej bilansu cieplnego

Lp.	Obliczana wielkość	Źródło
1	Wydatek metabolizmu ciała $M$	tab. 1, tab. 2
2	Brak styku z elementami zewnętrznymi, czyli utrata ciepła przez przewodzenie $K = 0$	(2)
3	Średnia temperatura skóry dla stanu ustalonego $T_{sk,eq\ cl}$	(13)
4	Określenie względnej prędkości powietrza $v_{ar}$	(25-26)
5	Dynamiczny współczynnik konwekcji $h_{c\ dyn}$	(4)
6	Współczynnik redukcji transportu ciepła przez izolację cieplną ubioru $F_{cl}$ , po empirycznym wyznaczeniu podstawowej	(5)

	statycznej izolacji cieplnej ubioru $I_{cl}$ lub jej oszacowaniu na podstawie normy PN-EN ISO 9920 i ISO 7933	
7	Współczynnik korekcji izolacji dynamicznej ubioru $C_{orr,tot}$	(22)
8	Obliczenie podstawowej dynamicznej (wynikowej) izolacyjności cieplnej ubioru $I_{cl,dyn}$	(18-22)
9	Przyjęcie powierzchni ciała poddanej konwekcji $A_C = \xi A$ ; $\xi = 0,67A$ całkowitej powierzchni ciała dla człowieka w przysiadzie; $\xi = 0,70A$ dla siedzącego i $\xi = 0,77A$ dla stojącego	-
10	Utrata ciepła przez konwekcję $C$ i promieniowanie $R$ poprzez iteracyjne rozwiązanie	(3, 8) z uwzględnieniem wzoru (13)
11	Przyjęcie powierzchni ciała poddanej promieniowaniu $A_C = \xi A$ ; $\xi = 0,67A$ całkowitej powierzchni ciała dla człowieka w przysiadzie; $\xi = 0,70A$ dla siedzącego i $\xi = 0,77A$ dla stojącego	-
12	Utrata ciepła przez promieniowanie $R$	(8)
13	Współczynnik korekty dynamicznego wskaźnika przepuszczalności wilgoci ubioru $C_{orr,E}$	(31)
14	Dynamiczny współczynnik przenikania wilgoci ubioru $i_{mdyn}$	(30)
15	Całkowita statyczna izolacja cieplna ubioru $I_{tot,st}$	(21)
16	Całkowita dynamiczna izolacja cieplna odzieży $I_{tot,dyn}$	(19)
17	Całkowity dynamiczny opór pary wodnej ubioru oraz warstwy brzegowej powietrza $R_{tdyn}$	(29)
18	Maksymalna utrata ciepła przez parowanie z powierzchni skóry $E_{max}$	(28)
19	Utrata ciepła przez konwekcję w układzie oddechowym $C_{res}$	(34)
20	Utrata ciepła przez parowanie w układzie oddechowym $E_{res}$	(36)
21	Nadwyżka ciepła w organizmie $S$	(37)

Jeśli  $S = 0$ , to ciało produkuje tyle ciepła, ile jest wydalone na zewnątrz. Bilans cieplny jest spełniony. Organizm jest w stanie równowagi termicznej, temperatura jest stała. Jeśli  $S > 0$ , to ciało produkuje więcej ciepła niż jest odprowadzane na zewnątrz. Bilans cieplny nie jest spełniony, nadwyżka ciepła pozostaje w organizmie i temperatura rośnie. Występuje tzw. hipertermia (prze-grzanie organizmu). Jeśli  $S < 0$ , to ciało produkuje mniej ciepła niż jest odprowadzane na zewnątrz. Bilans cieplny nie jest spełniony, występuje niedobór ciepła i temperatura spada. Występuje tzw. hipotermia (wyziębienie organizmu). Opis programu do rozwiązania postawionego problemu znajduje się w normie PN-EN ISO 7933 [11].

#### 1.4. Analiza ilościowa bilansu cieplnego

Analiza ilościowa polega na wczytaniu danych wejściowych, określeniu wszystkich wielkości bilansu oraz wielkości nadwyżki ciepła w organizmie. Posługując się nadwyżką ciepła, można następnie obliczyć wymagane wartości: gęstości strumienia utraty ciepła przez parowanie z powierzchni skóry, wilgot-

ności skóry oraz wydatku potu. Określana jest również temperatura rektalna w kolejnych iteracjach, począwszy od wstępnie przyjętej wartości początkowej.

### 1.4.1. Wymagana gęstość strumienia utraty ciepła przez parowanie z powierzchni skóry, wymagana wilgotność skóry i wymagany wydatek potu

Jako pierwszą określa się gęstość strumienia utraty ciepła przez parowanie z powierzchni skóry  $E_{wym}$ . Bilans cieplny jest określony zgodnie z zależnością (1), która w stanie równowagi powinna zostać spełniona przy nadwyżce ciepła w organizmie  $S = 0$ . Wymagana gęstość strumienia utraty ciepła z powierzchni skóry  $E_{wym}$  jest związana z dodatkowym wydatkiem metabolizmu, co wymaga uwzględnienia w bilansie ciepła dodatkowej wielkości  $dS_{rw}$ . W sensie fizycznym jest to wymagana utrata ciepła związana ze wzrostem temperatury ciała wynikającym z przyrostem wydatku metabolizmu [11]. Pozwala to przedstawić bilans ciepła w zmodyfikowanej postaci:

$$E_{wym} = M - W - C - R - C_{res} - E_{res} - dS_{rw}. \quad (38)$$

Wymagana wilgotność skóry  $w_{wym}$  jest określana jako bezwymiarowy stosunek wymaganych gęstości strumienia utraty ciepła z powierzchni skóry  $E_{wym}$  do maksymalnej utraty ciepła przez parowanie z powierzchni skóry  $E_{max}$  zgodnie z poniższym wzorem:

$$w_{wym} = \frac{E_{wym}}{E_{max}}. \quad (39)$$

Wymagany wydatek potu  $Sw_{wym}$  określony w  $W \cdot m^{-2}$  ma tak regulować gospodarkę cieplną organizmu, aby zapewnić równomierny rozkład potu na powierzchni ciała i w konsekwencji równomierny rozkład strumienia utraty ciepła przez parowanie na całej powierzchni skóry. Można go również określić następująco:

$$Sw_{wym} = \frac{E_{wym}}{r_{wym}}. \quad (40)$$

We wzorze tym  $r_{wym}$  oznacza wymaganą efektywność parowania potu. Określone w ten sposób wielkości  $w_{wym}$  oraz  $Sw_{wym}$  służą jedynie opisowi aktualnego stanu fizjologicznego organizmu. Nie powinny one osiągać wielkości maksymalnych, odpowiednio  $w_{max}$  i  $Sw_{max}$ , ocenianych według [11] jako zależne od ewentualnej aklimatyzacji człowieka. Maksymalny wydatek potu  $Sw_{max}$  może zostać określony zależnością empiryczną w postaci:

$$Sw_{max} = (M - 32)A_{Du}. \quad (41)$$

W powyższym związku  $M$  to wydatek metabolizmu w  $W \cdot m^{-2}$ ;  $A_{Du}$  – całkowita powierzchnia skóry według Du Boisa w  $m^2$ . Jeśli wymagana gęstość strumienia utraty ciepła z powierzchni skóry  $E_{wym}$  jest mniejsza niż wartość maksymalna  $E_{max}$ , to wymagana wilgotność skóry  $w_{wym} \leq 1$ . Oznacza to, że skóra jest tylko częściowo pokryta potem (wilgocią). Wymagana efektywność parowania potu  $r_{wym}$  jest wówczas określana arbitralną zależnością przedstawioną w pracy [11] w postaci:

$$w_{wym} \leq 1; \quad r_{wym} = 0,5(1 - w_{wym}^2). \quad (42)$$

Jeśli wymagana gęstość strumienia utraty ciepła z powierzchni skóry  $E_{wym}$  jest większa od maksymalnej  $E_{max}$ , wówczas wymagana wilgotność skóry  $w_{wym} \geq 1$ . Interpretacja fizyczna mówi, że skóra jest w pełni pokryta wilgocią. Wymagana efektywność parowania potu jest wówczas mniejsza niż poprzednio i opisana arbitralnie w pracy [11] jako:

$$w_{wym} \geq 1; \quad r_{wym} = 0,5(2 - w_{wym}^2). \quad (43)$$

Teoretycznie wymagana efektywność parowania potu wynosi  $r_{wym} = 0$  dla wartości  $w_{wym} = 1,4142$ . Praktycznie minimum wymaganej efektywności parowania może osiągnąć wartość równą 5%, co wynika z fizjologii człowieka. Mniejsze wartości nie są fizjologicznie możliwe do uzyskania. Dla określenia rozkładu czasowego wymaganego wydatku potu wprowadza się bezwymiarowy współczynnik  $k_{sw}$ . Opisuje on korelację między krokiem  $(i - 1)$ , opisanym przez czas  $t_{i-1}$  i wydatkiem potu  $Sw_{i-1}$  oraz krokiem  $i$ , opisanym przez czas  $t_i$  i wydatkiem potu  $Sw_i$ . Współczynnik ten można wyrazić następująco:

$$k_{sw} = \exp(-0,1 \cdot \Delta t); \quad \Delta t = t_i - t_{i-1}. \quad (44)$$

W przypadku gdy nie jest spełniony bilans cieplny, temperatura rektalna musi zostać ograniczona do pewnej wartości maksymalnej  $T_{re\ max}$ , dla zapobieżenia patologiom fizjologii użytkownika. Proces obliczeniowy i interpretację otrzymanych wyników określa się wykorzystując dwie grupy kryteriów:

- kryterium stresu opisane przez maksymalną wilgotność skóry  $w_{max}$  i maksymalny wydatek potu  $Sw_{max}$ ,
- kryterium wysiłku opisane przez maksymalną temperaturę rektalną  $T_{re\ max}$  i maksymalną utratę wilgoci przez organizm  $D_{max}$ .

## 1.4.2. Określenie temperatury rektalnej

Temperatura rektalna jest określana w wyniku procesu iteracyjnego, począwszy od pewnych przyjętych wartości początkowych. W kolejnym kroku  $i$  iteracji zachodzi następujący związek określający nadwyżkę ciepła w organizmie  $S$  określony w pracy [11]:

$$S = E_{wym} - E_p + S_{eq}. \quad (45)$$

W powyższej zależności  $E_{wym}$  to wymagana gęstość strumienia utraty ciepła z powierzchni skóry,  $E_p$  – wymagana gęstość strumienia utraty ciepła przez parowanie,  $S_{eq}$  – nadwyżka ciepła w organizmie wyrównująca wydatek metabolizmu przeznaczony na wzrost temperatury rdzenia ciała. Obie te wielkości są wyrażone w  $W \cdot m^{-2}$ . Nadwyżka ciepła w organizmie powoduje wzrost temperatury rdzenia ciała, co daje następnie podwyższenie temperatury skóry. Część masy ciała posiadająca temperaturę rdzenia jest opisana współczynnikiem  $(1 - \alpha)$ , a pozostała masa niemająca tej temperatury – współczynnikiem  $\alpha$  [11]. Wielkości te przyjmują postać:

$$(1 - \alpha) = 0,7 + 0,09(T_{rd} - 36,8), \quad (46)$$

$$\alpha = 0,3 - 0,09(T_{rd} - 36,8),$$

gdzie  $T_{rd,i}$  oznacza temperaturę rdzenia ciała określoną w  $^{\circ}C$ . Granice dolna i górna współczynnika  $(1 - \alpha)$  są według [11] opisane następująco:

$$(1 - \alpha) = 0,7 \text{ dla } T_{rd} < 36,8^{\circ}C; \quad (1 - \alpha) = 0,9 \text{ dla } T_{rd} < 39,0^{\circ}C. \quad (47)$$

Temperatura rdzenia ciała w kroku  $i$ -tej iteracji może zostać zapisana w postaci zależności od kroku  $(i - 1)$ -tej iteracji zgodnie ze wzorem podanym w pracy [11]:

$$T_{rd,i} = \frac{1}{1 - 0,5\alpha} \left[ \frac{dS_i}{c_p W_b} + T_{rd,i-1} - \frac{T_{rd,i-1} - T_{sk,i-1}}{2} \alpha_{i-1} - T_{sk,i} \frac{\alpha_i}{2} \right], \quad (48)$$

gdzie poza wyjaśnionymi wprowadzono nowe oznaczenia:  $dS_i$  – nadwyżka ciepła w organizmie w bieżącej iteracji w  $W \cdot m^{-2}$ ,  $c_p$  – ciepło właściwe suchego powietrza przy stałym ciśnieniu wyrażone w  $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ,  $W_b$  – masa ciała w  $kg$ ,  $T_{sk}$  – temperatura skóry w  $^{\circ}C$ . Temperaturę rektalną można z kolei przybliżyć za pomocą zależności empirycznej w kolejnych krokach iteracji zgodnie ze wzorem:

$$T_{re,i} = T_{re,i-1} + \frac{2T_{rd,i} - 1,962T_{re,i-1} - 1,31}{9}. \quad (49)$$

## 1.5. Omówienie struktury programu obliczeniowego

Program obliczeniowy jest omówiony w normie ISO 7933 [11]. Program jest jednorodny, jednak można w nim wyodrębnić kilka różnych segmentów ściśle połączonych ze sobą i stanowiących zamkniętą całość. Zostały one omówione poniżej.

### 1.5.1. Wczytanie bazowych wartości parametrów

Wczytywane wartości są niezależne od bieżącej iteracji czasu, czyli mają wartość ustaloną. Mogą ulec zmianie w innym miejscu programu przez podstawienie innych wartości. Przykładowy zestaw wartości przedstawiono poniżej w postaci:

- domyślna możliwość przyjęcia dowolnej ilości płynów ( $DRINK = 1$ ), założony został układ dwuwartościowy, w przeciwnym przypadku należy wczytać możliwość nieprzyjmowania płynów w ogóle ( $DRINK = 0$ ),
- masa ciała  $m_c = 75 \text{ kg}$ ,
- wzrost  $h = 1,8 \text{ m}$ ,
- powierzchnia ciała według Du Bois  $A_{Du}$  podana w  $m^2$ , patrz tabela 7,
- wymagany wydatek potu  $S_{Wp,i} = 0 \text{ W} \cdot m^{-2}$ ,
- temperatura rektalna  $T_{re} = 36,8^\circ\text{C}$ ,
- temperatura rdzenia ciała  $T_{rd} = 36,8^\circ\text{C}$ ,
- temperatura skóry  $T_{sk} = 34,1^\circ\text{C}$ ,
- temperatura rdzenia, która odpowiada aktualnemu wydatkowi metabolizmu  $T_{rd,eq,i} = 36,8^\circ\text{C}$ ,
- maksymalny dopuszczalny czas ekspozycji na działanie ciepła  $D_{lim\ tre} = 0 \text{ s}$ ,
- maksymalny czas ekspozycji na utratę wilgoci dla 50% populacji pracujących  $D_{lim\ 50} = 0 \text{ s}$ ; maksymalny czas ekspozycji na utratę wilgoci dla 95% populacji pracujących  $D_{lim\ 95} = 0 \text{ s}$ ,
- maksymalna utrata wilgoci wystarczająca dla ochrony 50% populacji pracujących  $D_{max\ 50}$  oraz maksymalna utrata wilgoci wystarczająca dla ochrony 95% populacji pracujących  $D_{max\ 95}$ :

$$\begin{aligned} D_{max\ 50} &= 0,075 \cdot \text{waga}[\text{kg}], \\ D_{max\ 95} &= 0,05 \cdot \text{waga}[\text{kg}]. \end{aligned} \tag{50}$$

- średnie stałe wykładnicze:
  - temperatura rdzenia ciała określona jako funkcja wydatku metabolizmu w stałym czasie  $10 \text{ min} = 600 \text{ s}$ :  
 $ConstTeq = \exp(-0,1)$ ,
  - temperatura skóry w stałym czasie  $3 \text{ min} = 180 \text{ s}$ :  
 $ConstTsk = \exp(-1/3)$ ,
  - wydatek potu w stałym czasie  $10 \text{ min} = 600 \text{ s}$ :  
 $ConstSw = \exp(-0,1)$ ,
- czas trwania sekwencji pracy  $480 \text{ min.}$ , iteracje są określone co  $1 \text{ min} = 60 \text{ s}$ , czyli cały proces iteracyjny może być podzielony maksymalnie na 480 kroków,
- temperatura powietrza  $T_a = 40^\circ\text{C}$ ,
- średnia temperatura promieniowania ubioru  $T_r = 40^\circ\text{C}$ ,
- ciśnienie cząstkowe pary wodnej  $p_a = 2,5 \text{ kPa}$ ,



- prędkość powietrza  $v_a = 0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,
- wydatek metabolizmu na jednostkę powierzchni ciała  $M = 150 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ,
- efektywna praca mechaniczna  $W = 0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ,
- pozycja (1 = siedząca; 2 = stojąca; 3 = w przysiadzie),
- statyczna izolacja cieplna odzieży  $I_{cl} = 0,5 \text{ clo}$  (ubiór lekki: majtki, koszula z krótkim rękawem, dopasowane spodnie, skarpety, buty),
- bezwymiarowy statyczny wskaźnik przepuszczalności wilgoci odzieży  $i_{mst} = 0,38$ ,
- bezwymiarowy udział powierzchni ciała pokrytej odzieżą refleksyjną odbijająca promieniowanie  $A_R = 0,54$ ,
- bezwymiarowa emisyjność odzieży odbijającej promieniowanie  $F_R = 0,97$ ,
- prędkość chodu  $v_w$  podawana w  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; w przeciwnym przypadku jest przyjmowana domyślna prędkość chodu równa  $v_w = 0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,
- kąt rozkładu prędkości chodu na kierunek prędkości powietrza  $\theta$  podawany w stopniach; w przeciwnym przypadku jest przyjmowany domyślny równy  $\theta = 0^\circ$ ,
- przyjęcie domyślnej aklimatyzacji człowieka w odzieży o kodzie  $accl = 100$ ; w przeciwnym przypadku jest zadawany kod  $accl = 0$ , oznaczający brak aklimatyzacji,
- przyjęcie powierzchni ciała poddanej promieniowaniu  $A_C = \xi A$ :
  - $\xi = 0,70A$  całkowitej powierzchni ciała dla człowieka siedzącego,
  - $\xi = 0,77A$  całkowitej powierzchni ciała dla człowieka stojącego,
  - $\xi = 0,67A$  całkowitej powierzchni ciała dla człowieka w przysiadzie.

### 1.5.2. Określenie maksymalnego wydatku potu $S_{w\max}$ jako funkcji wydatku metabolizmu

W celu określenia maksymalnego wydatku potu wykorzystuje się związek (41). Jednocześnie określa się granice: górną i dolną maksymalnego wydatku potu posługując się zależnościami:

$$\begin{aligned} \text{jeśli } S_{w\max} > 400 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2} \text{ przyjmuje się } S_{w\max} &= 400 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}, \\ \text{jeśli } S_{w\max} < 250 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2} \text{ przyjmuje się } S_{w\max} &= 250 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}. \end{aligned} \quad (51)$$

Dla użytkownika niepoddanego gwałtownym zmianom temperatury i wilgotności maksymalny wydatek potu podwyższa się o 25%. Ponadto określa się maksymalną wilgotność skóry  $w_{\max}$  jako równą odpowiednio:

$$\begin{aligned} \text{aklimatyzacja użytkownika, przyjmuje się } w_{\max} &= 0,85, \\ \text{brak aklimatyzacji użytkownika, przyjmuje się } w_{\max} &= 1,0. \end{aligned} \quad (52)$$

### 1.5.3. Określenie temperatury rdzenia ciała, która odpowiada aktualnemu wydatkowi metabolizmu

W algorytmie oceny temperatury rdzenia ciała w pierwszej kolejności określa się temperaturę ustaloną, wynikającą z aktualnego wydatku metabolizmu zapisaną empirycznym związkiem w postaci:

$$T_{rd,eqM} = 0,0036 \cdot (M - 55) + 36,8. \quad (53)$$

Przybliżenie wykładnicze temperatury rdzenia można określić następująco:

$$T_{rd,eq} = T_{rd,eq0} \cdot ConstT_{eq} + T_{rd,eqM} \cdot (1 - ConstT_{eq}), \quad (54)$$

gdzie temperatura początkowa rdzenia została przyjęta  $T_{rd,eq0} = 36,8^\circ C$ , zaś stałe wykładnicze podano w punkcie 1.5.1. Następnie określa się nadwyżkę ciepła w organizmie powodującą wzrost temperatury rdzenia ciała w bieżącej iteracji czasu, odnoszącą się do wydatku metabolizmu zgodnie ze wzorem:

$$dS_{eq} = \left( 57,83 \cdot \frac{m_c}{A_{Du}} \right) \cdot (T_{rd,eq} - T_{rd,eq0}) \cdot (1 - T_{sk,rd,wg}), \quad (55)$$

W powyższej zależności symbol  $T_{sk,rd,wg}$  oznacza związek między temperaturami skóry i rdzenia ciała, który w pierwszym kroku czasu jest równy zero, zaś w kolejnych jest obliczany według zależności (56), przyjmując zasady:

$$T_{sk,rd,wg} = 0,3 - 0,09 \cdot (T_{cr,i} - 36,8), \quad (56)$$

jeśli  $T_{sk,rd,wg} > 0,3$  przyjmuje się  $T_{sk,rd,wg} = 0,3$ ,

jeśli  $T_{sk,rd,wg} < 0,1$  przyjmuje się  $T_{sk,rd,wg} = 0,1$ ,

gdzie  $T_{cr,i}$  oznacza temperaturę rdzenia ciała w czasie  $t_i$ , czyli iteracji  $i$ .

### 1.5.4. Określenie temperatury skóry

Algorytm obliczania temperatury skóry przebiega według poniższego schematu.

- Jako pierwsza jest określana temperatura skóry w stanie równowagi  $T_{sk,eq\ cl}$ , dla użytkownika w ubiorze ( $I_{cl\ st} \geq 0,6\ clo$ ) jest ona określona zależnością (13) i jednocześnie zachodzi  $T_{sk,eq} = T_{sk,eq\ cl}$ .
- Dla użytkownika bez ubioru, czyli  $I_{cl\ st} \leq 0,2\ clo$ , temperatura skóry w stanie równowagi  $T_{sk,eq\ nu}$  jest określona związkiem (12) oraz  $T_{sk,eq} = T_{sk,eq\ nu}$ .
- Dla wartości izolacji cieplnej  $0,2\ clo \leq I_{cl\ st} \leq 0,6\ clo$  średnia temperatura skóry dla stanu ustalonego  $T_{sk,eq}$  jest aproksymowana zależnością (14).
- Następnie należy aproksymować temperaturę skóry  $T_{sk,i}$  oraz ciśnienie nasyconej pary wodnej  $p_{sk,s}$  dla zadanej temperatury skóry w bieżącej iteracji  $i$  za pomocą związków:

$$T_{sk,i} = T_{sk,i-1} \text{ConstTsk} + T_{sk,eq} (1 - \text{ConstTsk}),$$

$$p_{sk,s} = 0,6105 \cdot \exp\left(17,27 \cdot \frac{T_{sk,i}}{T_{sk,i} + 237,3}\right). \quad (57)$$

### 1.5.5. Charakterystyka właściwości cieplnych odzieży

Algorytm określania właściwości cieplnych odzieży obejmuje etapy wymienione poniżej.

- Przyjmuje się do obliczeń, że statyczna izolacja cieplna odzieży wynosi  $I_{cl\ st} = 0,155 \text{ Iclm}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ .
- Bezwymiarowy współczynnik redukcji transportu ciepła przez izolację cieplną odzieży  $F_{cl}$  można opisać związkami (5). Następnie jest przyjmowana całkowita statyczna izolacja cieplna odzieży dla człowieka bez ubioru  $I_{a\ st} = 0,111 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ . Z kolei całkowita statyczna izolacja cieplna odzieży jest przedstawiona zależnością (21).
- W ramach tego punktu należy też przeanalizować względność ruchu człowieka i wiatru. Jeśli obie prędkości chodu  $v_w$  i wiatru  $v_a$  są różne od zera, to należy rozważyć trzy przypadki:
  - pierwszy dotyczy chodu w jednym kierunku, wówczas rzutujemy prędkość chodu na kierunek prędkości powietrza z uwzględnieniem kąta rozkładu  $\theta$ , otrzymując zależność (25),
  - w przypadku ruchu z prędkościami o zmiennych wartościach określa się je zależnościami (26),
  - jeśli prędkość ma nieokreśloną wartość lub użytkownik pozostaje w spoczynku, prędkość chodu dla zakresu  $v_w < 0,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  wyraża związek (27).
- Izolacja cieplna odzieży powinna być skorygowana z uwagi na wprowadzone wyżej prędkości wiatru  $v_a$  i chodu  $v_w$ . Prędkości są ograniczone do zakresów  $v_a < 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  oraz  $v_w < 1,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Korekcja przebiega wg zależności:
  - współczynnik korekcji izolacji dynamicznej odzieży  $C_{orr,tot}$  dla człowieka w pełnym ubiorze (czyli odzieży o statycznej izolacji cieplnej  $I_{cl\ st} \geq 0,6 \text{ clo}$ ) wyraża się związkami (22),
  - współczynnik korekcji izolacji dynamicznej odzieży jako funkcja aktualnego ubioru jest opisana zależnością (23); odpowiednio odzież charakteryzuje statyczna izolacyjność  $I_{cl\ st} < 0,2 \text{ clo}$ ,
  - dla odzieży o statycznej izolacji cieplnej  $0,2 \text{ clo} \leq I_{cl\ st} \leq 0,6 \text{ clo}$  współczynnik korekcji izolacji dynamicznej odzieży można aproksymować związkami (24), z uwzględnieniem związków (22) i (23).
- Całkowita dynamiczna izolacja cieplna odzieży  $I_{tot\ dyn}$  może zostać określona związkami (19), zaś dynamiczna izolacja cieplna warstwy brzegowej  $I_{a\ dyn}$  związkami (20). Wynikowa podstawowa dynamiczna izolacja cieplna odzieży  $I_{cl\ dyn}$  może zostać zapisana zależnością (18).

- Jako kolejny określa się wskaźnik przepuszczalności wilgoci odzieży. Korekta obejmuje wpływ wiatru i chodu człowieka, co wyraża  $C_{orr,E}$  – współczynnik korekty dynamicznego wskaźnika przepuszczalności wilgoci odzieży, zapisany zależnością (31). Zależność ta jest ważna dla  $i_{mst} \leq 0,9$ .
- Całkowity dynamiczny opór pary wodnej odzieży oraz warstwy brzegowej powietrza  $R_{tdyn}$  można określić z równania (29).

### 1.5.6. Określenie wszystkich składników wymiany ciepła

Wszystkie składniki wymiany ciepła oblicza się według algorytmu opisanego poniżej.

- Gęstość strumienia utraty ciepła przez konwekcję w układzie oddechowym  $C_{res}$  jest opisana jako funkcja metabolizmu, temperatury i ciśnienia powietrza w otoczeniu równaniem (34). Gęstość strumienia utraty ciepła przez parowanie w układzie oddechowym  $E_{res}$  jest opisana w funkcji podobnych parametrów przez związek (36).
- Dynamiczny współczynnik konwekcji  $h_{cdyn}$ , który jest zależny od różnicy temperatur skóry  $T_{sk,i}$  oraz powietrza  $T_a$  lub alternatywnie prędkości względnej powietrza na powierzchni odzieży jest opisany związkiem (4). Bezwymiarowy współczynnik radiacyjnej wymiany ciepła spowodowany odzieżą  $F_{cl,R}$  jest opisany równaniem (17).
- Temperaturę ubioru wynikającą ze zjawiska promieniowania  $T_{cl}$  można opisać równaniem (11). W tym celu określa się skorygowany współczynnik radiacyjnej wymiany ciepła  $h_{r,R}$  z uwagi na odzież odbijającą promieniowanie według wzoru (16). Występujący tutaj bezwymiarowy współczynnik radiacyjnej wymiany ciepła spowodowany ubiorem  $F_{cl,R}$  jest zdefiniowany przez zależność (17). Z kolei współczynnik radiacyjnej wymiany ciepła  $h_r$  jest opisany wzorem (15). Jeśli zmierzona średnia temperatura promieniowania  $T_r$  i temperatura ubioru  $T_{cl}$  różnią się więcej od założonej wartości (przyjętej w programie 0,001) wówczas jako nowa temperatura odzieży jest przyjmowana średnia arytmetyczna z tych dwóch wartości  $T_r$  i  $T_{cl}$ .
- Wartości wymiany ciepła przez konwekcję  $C$  i promieniowanie  $R$  między zewnętrzną powierzchnią odzieży i otoczeniem, czyli tzw. suchej wymiany ciepła określa się zgodnie z równaniem (9).
- Określenie maksymalnej gęstości strumienia utraty ciepła przez parowanie z powierzchni skóry  $E_{max}$  odbywa się według formuły (28).
- Jako ostatnią określa się w tym punkcie wymaganą gęstość strumienia utraty ciepła z powierzchni skóry  $E_{wym}$  związaną z dodatkowym wydatkiem metabolizmu, co wymaga uwzględnienia bilansu ciepła w postaci (38).

### 1.5.7. Algorytm wyznaczania temperatury

Algorytm ten obejmuje niżej opisane kroki.

- Określenie wymaganej wilgotności skóry  $w_{wym}$ , jako stosunku wymaganych gęstości strumienia utraty ciepła z powierzchni skóry  $E_{wym}$  do maksymalnej utraty ciepła przez parowanie z powierzchni skóry  $E_{max}$ , następuje według związku (39).
- Wyznaczenie wymaganego wydatku potu  $Sw_{wym}$  następuje w kilku krokach:
  - jeśli nie występuje utrata ciepła przez parowanie skóry, wówczas wydatek potu jest równy zero  $Sw_{wym} = 0$ ,
  - jeśli utrata ciepła przez parowanie nie jest możliwa, to wydatek potu jest maksymalny  $Sw_{wym} = Sw_{max}$ ,
  - Wydatek potu jest maksymalny  $Sw_{wym} = Sw_{max}$ , gdy wymagana wilgotność skóry  $w_{wym} \geq 1,7$ .
- Jeśli wymagana gęstość strumienia utraty ciepła z powierzchni skóry  $E_{wym}$  jest mniejsza niż wartość maksymalna  $E_{max}$ , to wymagana efektywność parowania potu  $r_{wym}$  jest określana zależnością (42). Jeśli wymagana gęstość strumienia utraty ciepła z powierzchni skóry  $E_{wym}$  jest większa od maksymalnej  $E_{max}$ , wówczas wymagana efektywność parowania potu jest opisana w postaci (43).
- Następnie należy aproksymować wymagany wydatek potu  $Sw_{p,i}$  w iteracji  $i$  za pomocą następujących związków wykładniczych:

$$Sw_{p,i} = Sw_{p,i} ConstSw + Sw_{wym} (1 - ConstSw). \quad (58)$$

- Kolejny krok to obliczenie wymaganej gęstości strumienia utraty ciepła przez parowanie. Dla skóry częściowo wilgotnej jest ona opisana zależnością (32). Wilgotność  $w$  występująca w tym związku jest wyznaczona wariantowo:
  - dla  $w > w_{max}$  wilgotność przyjmuje się na poziomie maksymalnym  $w = w_{max}$ ,
  - jeśli stosunek maksymalnej gęstości strumienia utraty ciepła z powierzchni skóry  $E_{max}$  i wymaganego wydatku potu  $Sw_{p,i}$  w iteracji  $i$  jest  $k = E_{max}/Sw_{p,i} \geq 0,5$ , wtedy zachodzi zależność empiryczna:

$$w = -k + \sqrt{k^2 + 2}, \quad (59)$$

- w pozostałych przypadkach jest przyjmowana wartość  $w = 1$ .
- Nadwyżkę ciepła w organizmie  $dS_i$  można określić następująco, posługując się zależnością (45):

$$dS_i = E_{wym} - E_p + dS_{eq}. \quad (60)$$

### 1.5.8. Określenie temperatury rdzenia ciała

Wykorzystuje się tutaj związek między temperaturami skóry i rdzenia ciała  $T_{sk,rd,wg}$ , który jest obliczany według zależności (56). Temperatura rdzenia ciała  $T_{rd,i}$  w kroku  $i$  iteracji może zostać zapisana w postaci iteracyjnej (48). Jeśli zmierzona średnia temperatura rdzenia  $T_{rd,i}$  w kroku  $i$  iteracji i  $T_{rd,i-1}$  w kroku  $(i - 1)$  różnią się więcej od założonej wartości (przyjętej w programie 0,001), wówczas jako nowa temperatura rdzenia jest przyjmowana średnia z tych dwóch wartości.

### 1.5.9. Określenie temperatury rektalnej

Algorytm określenia temperatury rektalnej obejmuje niżej opisane kroki.

- Temperaturę rektalną przybliża się empirycznie, w kolejnych krokach iteracji, za pomocą zależności (49).
- Sprawdza się następujący warunek dla maksymalnego dopuszczalnego czasu ekspozycji na działanie ciepła  $D_{lim\ tre}$  i temperaturę rektalną  $T_{re,i}$ :

$$\begin{aligned} &\text{jeśli } D_{lim\ tre} = 0 \text{ s i } T_{re,i} \geq 38^{\circ}\text{C}, \\ &\quad \text{przyjmuje się} \\ &D_{lim\ tre} = \text{aktualny czas iteracji}. \end{aligned} \quad (61)$$

- Maksymalny czas ekspozycji na utratę wilgoci dla 50% populacji pracujących  $D_{lim\ 50} = 0 \text{ s}$ , maksymalny czas ekspozycji na utratę wilgoci dla 95% populacji pracujących  $D_{lim\ 95} = 0 \text{ s}$ .
- Całkowita utrata wilgoci  $Sw_{c,i}$  w danym kroku  $i$  iteracji jest określona zależnością empiryczną w postaci:

$$Sw_{c,i} = \frac{2,67(Sw_{c,i-1} + Sw_{p,i} + E_{res})A_{Du}}{(1,8 \cdot 60)}. \quad (62)$$

- Powyższe obliczenia pozwalają sformułować wnioski dotyczące maksymalnego czasu ekspozycji na utratę wilgoci dla: 50% populacji pracujących  $D_{lim\ 50}$ , dla 95% populacji pracujących  $D_{lim\ 95}$ , maksymalnej utraty wilgoci wystarczającej dla ochrony 50% populacji pracujących  $D_{max\ 50}$ , dla ochrony 95% populacji pracujących  $D_{max\ 95}$ , braku możliwości przyjęcia płynów ( $DRINK = 0$ ) i całkowitej utraty wilgoci  $Sw_c$ , według zależności:

$$\begin{aligned} &\text{jeśli } D_{lim\ 50} = 0 \text{ i } Sw_{c,i} \geq D_{max\ 50} \text{ przyjmuje się } D_{lim\ 50} = \text{aktualny czas iteracji}. \\ &\text{jeśli } D_{lim\ 95} = 0 \text{ i } Sw_{c,i} \geq D_{max\ 95} \text{ przyjmuje się } D_{lim\ 95} = \text{aktualny czas iteracji}. \end{aligned} \quad (63)$$

Jeśli przyjąć brak uzupełniania płynów, można zapisać:

$$\text{jeśli } DRINK = 0 \text{ przyjmuje się } D_{lim\ 95} = 0,6 \cdot D_{lim\ 95} \text{ i } D_{lim\ 50} = D_{lim\ 95} \quad (64)$$

### 1.5.10. Wydruk wyników

Końcowy wydruk obliczeń dokonanych przez program obejmuje:

- temperaturę rektalną  $T_{re}$ ,
- całkowitą utratę wilgoci  $Sw_c$ ,
- maksymalny dopuszczalny czas ekspozycji na działanie ciepła  $D_{lim tre}$ ,
- maksymalny czas ekspozycji na utratę wilgoci dla 50% populacji pracujących  $D_{lim 50}$ ,
- maksymalny czas ekspozycji na utratę wilgoci dla 95% populacji pracujących  $D_{lim 95}$ .

### 1.6. Wnioski płynące z analizy wieloparametrowego bilansu ciepła dla użytkownika odzieży

Wieloparametrowy bilans ciepła dla ciała użytkownika uwzględnia wszystkie mechanizmy utraty ciepła włącznie z ilościowo marginalnymi w układzie oddechowym oraz wiele parametrów opisujących te zjawiska. Wszystkie wielkości modelują wpływ izolacji odzieży, konstrukcji odzieży i czynników otoczenia. Zaletą przedstawionego modelu to jego ewidentna kompleksowość, opis wielu zjawisk występujących podczas transportu ciepła, uwzględnienie szeregu zależności empirycznych sprawdzonych na szerokiej populacji użytkowników odzieży. Wieloparametrowy bilans ciepła stanowi zamknięty model o charakterze złożonym, który umożliwia wyznaczenie szeregu parametrów istotnych dla użytkownika ubioru: temperatury rektalnej, całkowitej utraty wilgoci, maksymalnego dopuszczalnego czasu ekspozycji na działanie ciepła, czy maksymalnych czasów ekspozycji na utratę wilgoci. Wprowadzony model jest bardzo skomplikowany, jednak nawet tak wielka złożoność nie gwarantuje pełnego ujęcia zjawiska. Zawiera szereg uproszczeń, zarówno w modelowaniu fizycznym, jak i opisie matematycznym. Model ten nie uwzględnia bezpośrednio transportu masy (czyli wilgoci) ze skóry do otoczenia. Jest on uwzględniany tylko jako wydatek ciepła powstały podczas transportu masy, a odpowiednie parametry dotyczące gęstości strumienia wydzielania potu, jak i charakterystyczne czasy ekspozycji wynikają z wielkości opisujących transport ciepła. Mimo zbilansowania wyłącznie przepływu ciepła bez rozpatrzenia sprzężonego przewodzenia ciepła i masy, model ten można uznać za wystarczająco uniwersalny dla celów globalnych. Istotną niedogodność takiego sformułowania globalnego polega na niemożliwości jego adaptacji do problemów lokalnych, np. optymalnego projektowania kształtu lub własności materiałowych przekroju poprzecznego konstrukcji ubioru poddanego różnym obciążeniom cieplnym i wilgoci. Wrażliwość takiego modelu na dynamiczne zmiany impulsów ciepła i wilgoci może być niewystarczająca, szczególnie przy dużych gradientach przyrostu lub spadku zmiennych stanu. Wszystko to powoduje, że należy dążyć do

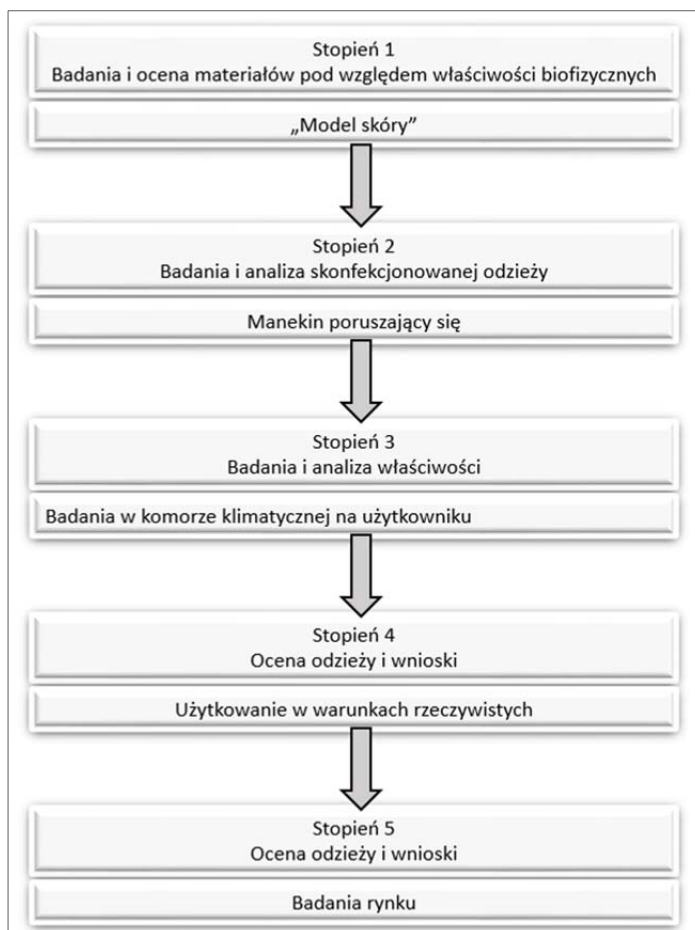
implementacji danych globalnych uzyskanych z rozwiązania powyższego problemu w modelu lokalnym w celu bezpośredniego określania wielkości i parametrów lokalnych.

### **1.7. Metody pomiaru właściwości biofizycznych odzieży ochronnej z grupy ŚOI wpływających na komfort fizjologiczny użytkownika**

Rozważania teoretyczne odnoszące się do obliczeń będących podstawą analizy jakościowej bilansu cieplnego użytkowników środków ochrony indywidualnej, przedstawione w rozdziałach 1.2-1.5, wskazują na potrzebę zdefiniowania, a następnie wyznaczenia empirycznego określonych wielkości charakteryzujących właściwości biofizyczne materiałów, z których wykonana jest odzież, jak i samej odzieży. W sensie fizycznym są to dwie podstawowe wielkości fizyczne: opór cieplny i opór pary wodnej w przypadku materiałów oraz izolacyjność cieplna oraz opór pary wodnej w przypadku odzieży. Opór cieplny i izolacyjność cieplna mogą być wyznaczone empirycznie w warunkach ustalonego przepływu strumienia ciepła, ale również w warunkach nieustalonego przepływu strumienia ciepła. Stan prawny odnoszący się do norm zharmonizowanych przewiduje dokonanie pomiaru omawianych wielkości w warunkach ustalonego przepływu strumienia ciepła. Zgodnie z metodyką podaną przez Umbacha, odnoszącą się do oceny właściwości biofizycznych odzieży, badania prowadzone w warunkach ustalonego przepływu strumienia ciepła obejmują tylko dwa pierwsze etapy w jego pięciostopniowym modelu, przedstawionym na rysunku 4 [25].

Pierwszy stopień obejmuje badania materiałów odzieżowych przy użyciu przyrządu, który umożliwia symulację transportu strumienia ciepła i potu przez skórę w warunkach stacjonarnych. Drugi stopień badań dotyczy oceny właściwości biofizycznych odzieży na poruszającym się manekinie, który jest modelem sylwetki człowieka o stałej temperaturze jego ciała. Należy podkreślić, że badania te mają charakter symulacyjny, w których strumień ciepła generowany pomiędzy manekinem a otoczeniem jest stały. W trzecim etapie badań są przeprowadzone próby z odzieżą na użytkowniku w komorze klimatycznej w określonych warunkach temperatury, wilgotności powietrza i przy założonym wydatku energetycznym człowieka. Zweryfikowanie wyników badań następuje w 4 i 5 punkcie modelu podczas rzeczywistego użytkowania wyrobu [25].





Rys. 4. Model badania odzieży

Źródło: [25].

Podobny model zaproponowano w projekcie normy przygotowanym w Komitecie Technicznym CEN/TAC 122/JWG 9 pt.: „Thermal characteristic of personal protective equipment”. Proponuje się tam następujący program badań:

- badania materiałów przed podjęciem produkcji w zakresie:
  - oporu przenikania pary wodnej,
  - oporu cieplnego,
  - przepuszczalności powietrza,
- badania prototypu ubioru – na manekinie,
- badania prototypu ubioru – na użytkowniku w komorze klimatycznej,
- badania serii produkcyjnej ubioru w trakcie użytkowania [26].

W Centralnym Instytucie Ochrony Pracy, w ramach zadania badawczego realizowanego w Strategicznym Programie Rządowym SPR – 1, przeprowadzono badania właściwości biofizycznych materiałów i odzieży ochronnej w oparciu o dwustopniowy model badań:

- badania na aparacie typu „model skóry”,
- badania odzieży wykonanej z tych materiałów na użytkowniku w komorze klimatycznej [27].

Na przestrzeni lat, kiedy podjęto działania zmierzające do wyznaczania obiektywnych wskaźników opisujących właściwości biofizyczne tekstyliów, prowadzono pomiary związane z oceną ciepłochronności tekstyliów i przepuszczalnością pary wodnej [28, 29]. Pomiary te wykonywane były oddzielnie. Niemniej jednak badanie pojedynczych właściwości nie pozwala na kompleksowe określenie właściwości wyrobu i znalezienie wzajemnych zależności pomiędzy poszczególnymi parametrami. Dlatego też opracowano przyrządy pomiarowe oparte na modelowym ujęciu własności skóry człowieka. Opis tych metod przedstawiono poniżej.

### **1.7.1. Metodyka badań właściwości biofizycznych materiałów odzieżowych w warunkach ustalonego przepływu ciepła**

Oryginalne rozwiązanie koncepcji pomiaru właściwości biofizycznych tekstyliów zaproponowane przez Farnwortha zostało rozwinięte przez naukowców z Bekleidungsphysiologisches Institut w Hohenstain [30], a następnie znormalizowane [31]. Szczegółowy opis metodyki oceny właściwości biofizycznych materiałów przeznaczonych na odzież przedstawiono w książce pt. „Systemy pomiarowe we włókiennictwie” autorstwa Krucińskiej, Koneckiego i Michałak [30]. Obecnie zostaną przytoczone wybrane fragmenty tego opracowania ilustrujące metodykę badań stosowaną zgodnie z normą europejską PN-EN ISO 11092:2014-11[31].

Norma europejska PN-EN ISO 11092:2014-11 [31] umożliwia wyznaczenie oporu cieplnego, oporu pary wodnej, wskaźnika przenikania pary wodnej oraz przepuszczalności pary wodnej. Zgodnie z prawem Fouriera wyprowadzonym dla bariery w postaci prostopadłościowej ścianki opór cieplny, którego jednostką jest  $Km^2/W$  został zdefiniowany jako wielkość określająca (cyt.) „przepływ suchego strumienia ciepła przez dany wyrób włókienniczy w wyniku utrzymania stałej różnicy temperatur pomiędzy dwoma stronami materiału. W normie zakłada się, iż suchy strumień ciepła może składać się z ciepła unoszenia, przewodzenia i promieniowania i można go obliczyć jako iloraz różnicy temperatur pomiędzy dwoma zewnętrznymi powierzchniami materiału i wynikającej z tej różnicy wielkości przepływu strumienia ciepła przez jednostkową powierzchnię w kierunku zgodnym z gradientem temperatury”. Określając moc prądu dostarczonego do płyty grzejnej przyrządu pomiarowego celem utrzymania stałej temperatury płyty na poziomie  $35^{\circ}C$ , opór cieplny badanego materiału można obliczyć zgodnie ze wzorem:

$$R_c = \frac{(T_m - T_a) \cdot A}{H - \Delta H_c} - R_{c0} \quad (65)$$

gdzie:  $T_m$  – temperatura płyty grzejnej, °C,  $T_a$  – temperatur powietrza, °C,  $A$  – powierzchnia płyty pomiarowej,  $m^2$ ,  $H$  – moc grzejna dostarczana do płyty pomiarowej,  $W$ ;  $\Delta H_c$  – poprawka mocy grzejnej w przypadku pomiaru oporu cieplnego,  $W$ ;  $R_{c0}$  – stała przyrządu dotycząca pomiaru oporu cieplnego,  $m^2K/W$ .

Opór pary wodnej wyrażony w  $m^2Pa/W$  określono zgodnie z prawem Holliesia i Goldmana. Opór ten według definicji podanej w normie [31], (cyt.) „*jest wielkością określającą utajony strumień ciepła parowania przepływający przez daną powierzchnię w wyniku utrzymania stałej różnicy ciśnienia pary wodnej pomiędzy powierzchnią a otoczeniem. Można go obliczyć jako iloraz różnicy ciśnień pary wodnej między dwoma stronami materiału i wynikającej z tej różnicy wielkości przepływu strumienia ciepła parowania przez jednostkową powierzchnię w kierunku zgodnym z gradientem ciśnienia*”. Po umieszczeniu próbki roboczej na płycie pomiarowej po osiągnięciu stanu równowagi określa się wartości oporu pary wodnej z równania:

$$R_e = \frac{(p_m - p_a) \cdot A}{H - \Delta H_e} - R_{e0} , \quad (66)$$

gdzie:  $p_m$  – ciśnienie cząstkowe nasyconej pary wodnej przy powierzchni płyty pomiarowej w temperaturze  $T_m$ ,  $Pa$ ,  $p_a$  – ciśnienie cząstkowe pary wodnej w powietrzu znajdującym się w komorze pomiarowej w temperaturze  $T_a$ ,  $Pa$ ,  $A$  – powierzchnia płyty pomiarowej,  $m^2$ ,  $H$  – moc grzejna dostarczana do płyty pomiarowej,  $W$ ,  $\Delta H_e$  – poprawka mocy grzejnej w przypadku pomiaru oporu pary wodnej,  $W$ ,  $R_{e0}$  stała przyrządu dotycząca pomiaru oporu pary wodnej,  $m^2Pa/W$ .

W oparciu o znajomość wartości liczbowych oporu pary wodnej  $R_e$  i oporu cieplnego  $R_c$  norma zakłada możliwość określenia wskaźnika przenikania pary wodnej jako wielkości bezwymiarowej określonej zgodnie z równaniem:

$$i_m = SR_c / R_e , \quad (67)$$

w którym  $S$  wynosi  $60 Pa/K$ . Ostatnim wskaźnikiem zdefiniowanym w normie [31] jest przepuszczalność pary wodnej jako wielkość zależna od oporu pary wodnej i utajonego ciepła parowania wody określona zgodnie ze wzorem:

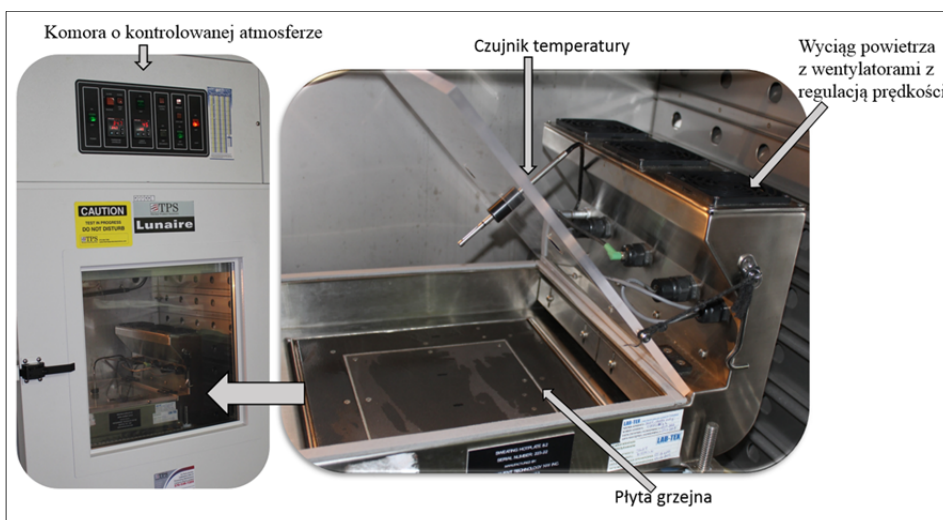
$$W_d = 1 / R_c \phi_{T_m} , \quad (68)$$

gdzie:  $\phi_{T_m}$  jest utajonym ciepłem parowania wody w temperaturze  $T_m$  płyty pomiarowej. Mianem tej wielkości jest  $g/m^2hPa$ .

Stanowisko badawcze umożliwiające wyznaczenie wyżej zdefiniowanych wielkości fizycznych zbudowane jest z kilku części składowych obejmujących:

- zestaw płyty grzejnej,
- wyciąg powietrza z wentylatorami z regulacją prędkości,
- czujniki temperatury otoczenia, wilgotności względnej i prędkości wiatru,
- system sterowania i zapisu zmian pobranej mocy prądu elektrycznego,
- komorę o kontrolowanej atmosferze.

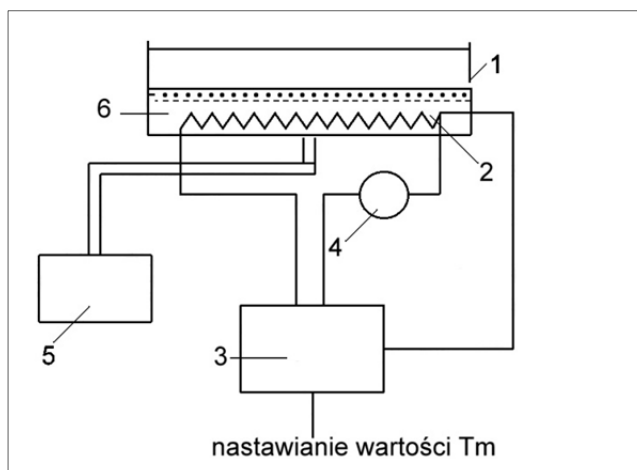
Widok przykładowych części składowych stanowiska pomiarowego skonstruowanego przez firmę Measurement Technology Northwest przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Widok przykładowych części składowych stanowiska pomiarowego skonstruowanego przez firmę Measurement Technology Northwesto nazwie Sweating Hotplate 8.2

Źródło: opracowanie własne.

Zestaw płyty grzejnej składa się z trzech oddzielnie ogrzewanych stref zamontowanych na tacy ze stali nierdzewnej. Układ posiada jedną strefę aktywną termicznie w postaci płyty pomiarowej i dwie osłony termiczne, uniemożliwiające transport ciepła przez inne strefy niż pomiarowa. Wszystkie strefy kontrolowane są niezależnie w celu utrzymania ich temperatury na stałym poziomie wynoszącym  $35^{\circ}\text{C}$ . Moc elektryczna dostarczona do grzałek w celu utrzymania stałej temperatury kompensuje strumień ciepła odprowadzony przez badany materiał do otoczenia. Schemat ideowy stanowiska pomiarowego przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Płyta pomiarowa z kontrolą temperatury i zasilania wody: 1 – płytka metalowa, 2 – czujnik temperatury, 3 – regulator temperatury, 4 – miernik mocy prądu elektrycznego, 5 – zbiornik na wodę, 6 – płyta grzejna

Źródło: [31].

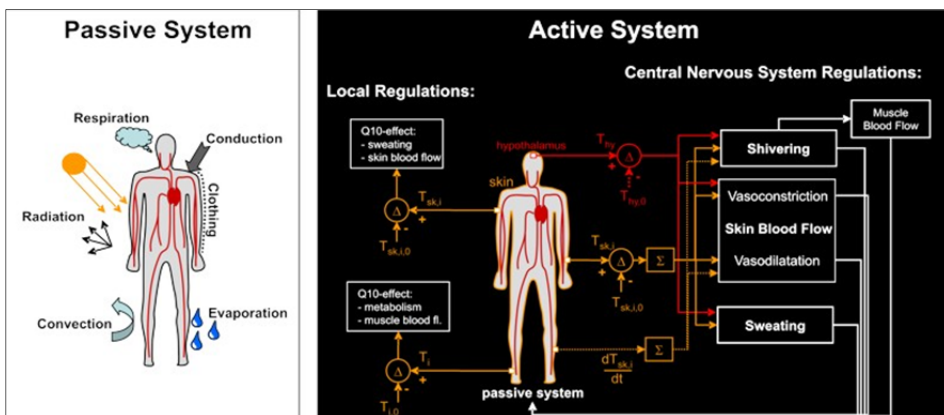
Płyta pomiarowa składa się z metalowego porowatego spieku 1 o grubości około 3 mm, o powierzchni co najmniej  $0,04 \text{ m}^2$ , przymocowanego do przewodzącego metalowego bloku zawierającego elektryczny element grzejny 6. W bloku tym umieszczone są kanały doprowadzające wodę z dozownika 5 do porowatego spieku. W celu utrzymania stałej wartości parowania urządzenie dozujące uruchamiane jest przy użyciu regulatora, który włącza urządzenie, gdy poziom wody obniża się więcej niż o 1,0 mm poniżej powierzchni płyty. Dostarczona woda do płyty jest uprzednio podgrzewana do temperatury tej płyty. Płyta pomiarowa w trakcie wykonywania badań powinna mieć stałą temperaturę  $T_m$ . Jest ona utrzymywana w wyniku zastosowania regulatora temperatury 3 wraz z czujnikiem temperatury płyty pomiarowej 2. Dostarczana moc grzejna do płyty 2. Dostarczana moc grzejna do płyty  $H$  w celu utrzymania stałej jej temperatury jest mierzona miernikiem 4. W celu wymuszenia przepływu strumienia cieplnego w kierunku prostopadłym do płaszczyzny płyty, płyta pomiarowa umieszczona jest w izolatorze cieplnym. W celu utrzymania stałej temperatury i wilgotności otoczenia płyta pomiarowa wraz z izolatorem cieplnym umieszczona jest w komorze pomiarowej, w której klimatyzowane powietrze powinno przepływać równoległe do górnej powierzchni płyty pomiarowej. W trakcie badania odchylenia temperatury i wilgotność strumienia powietrza nie powinny być większe od wartości założonych odpowiednio o  $\pm 0,1 \text{ K}$  i 3%. Średnia prędkość przepływu powietrza o temperaturze  $20^\circ\text{C}$  zmierzona w odległości 15 mm powyżej stołu pomiarowego nad środkiem płyty pomiarowej powinna wynosić  $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  z odchyleniem nieprzekraczającym  $\pm 0,05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . W celu dokonania pomiaru oporu cieplnego  $R_c$  należy ustawić temperaturę płyty pomiarowej na poziomie  $35^\circ\text{C}$ , temperatura powietrza powinna wynosić  $20^\circ\text{C}$  przy wilgotności względnej R.H. równej 65%. Prędkość

powietrza powinna być równa  $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . W celu dokonania pomiaru oporu pary wodnej należy pokryć powierzchnię płyty pomiarowej celofanową membraną, przepuszczającą parę wodną, lecz nieprzepuszczającą wody. Badania należy przeprowadzić przy jednakowej temperaturze płyty pomiarowej i powietrza na poziomie  $35^\circ\text{C}$ , przy wilgotności względnej R.H. równej 40%. W trakcie pomiaru należy utrzymać prędkość powietrza równą  $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Te izotermiczne warunki zapobiegają kondensacji pary wodnej w badanej próbce roboczej.

### 1.7.2. Metodyka badań właściwości biofizycznych odzieży ochronnej w warunkach ustalonych

Metodyka badań właściwości biofizycznych odzieży ochronnej uregulowana jest prawnie w postaci normy zharmonizowanej PN-EN ISO 15831 [32]. Badania prowadzi się z użyciem manekinów termicznych. Pierwsze manekiny termiczne powstały w połowie lat 40. XX wieku i służyły potrzebom armii amerykańskiej [33, 34]. W chwili obecnej istnieje już ponad 100 wielofunkcyjnych manekinów, które są w użyciu na całym świecie i służą rozwojowi nauki i techniki. Obecnie spotykane w przemyśle odzieżowym manekiny można podzielić na trzy typy, do których należą:

- manekiny stojące, które nie posiadają funkcji poruszania się i pocenia,
- manekiny poruszające się, ale nieposiadające funkcji pocenia,
- manekiny poruszające się, które posiadają funkcję pocenia się [34],
- manekiny symulujące funkcje życiowe człowieka inne niż ruch [35-36].



Rys. 7. Manekin termiczny FIALA-FE

Źródło: [39].

Najnowszym rozwiązaniem są manekiny posiadające symulację krążenia krwi i oddechu [37-38]. Jednym z nich jest manekin o nazwie FIALA-FE przedstawiony na rysunku 7 [39]. Użytkownik manekina FIALA-FE może przeprowadzić badania bilansu cieplnego w warunkach symulujących przepływ krwi,

oddychanie, parowanie, reakcje metaboliczne, wydatek potu, reakcję dreszczy oraz tempo bicia serca. Podczas użytkowania manekina FIALA-FE w niskich temperaturach obliczanie bilansu cieplnego uwzględnia zwężenie naczyń krwionośnych w jego wnętrzu. Kolejnym zaawansowanym technologicznie rozwiązaniem jest manekin o nazwie ADAM. Manekin ten składa się ze 120 indywidualnie sterowanych segmentów, gdzie każdy segment jest samodzielnym urządzeniem, w którym dokonywany jest pomiar temperatury, dystrybucji potu oraz wielkości przepływającego strumienia ciepła. Konstrukcja manekina odzwierciedla budowę i właściwości termiczne tkanek ludzkich. Między innymi struktura rąk i nóg składa się z „kości”, „mięśni”, „tkanki tłuszczowej” i „skóry”. Symulowany jest przepływ krwi przez tkanki poprzez system rurek i kapilar [37]. Ostatnie rozwiązania są w fazie badawczej i nie są dostępne na rynku.

W Polsce jednym z najnowocześniejszych manekinów termicznych, który służy między innymi do pomiaru wielkości fizycznych decydujących o komforcie fizjologicznym użytkownika (rys. 8) dysponuje Katedra Materiałoznawstwa, Towaroznawstwa i Metrologii Włókienniczej na Wydziale Technologii Materiałowych i Wzornictwa Tekstyliów Politechniki Łódzkiej. Manekin ten został wykonany przez firmę Measurement Technology Northwest w Seattle, Waszyngton i nosi nazwę *Newton* [38, 40-42]. Posiada on 34 strefy grzewcze służące do pomiaru właściwości biofizycznych odzieży w różnych częściach ciała. Manekin może być użytkowany w zakresie temperatur od  $-20^{\circ}\text{C}$  do  $+50^{\circ}\text{C}$ .

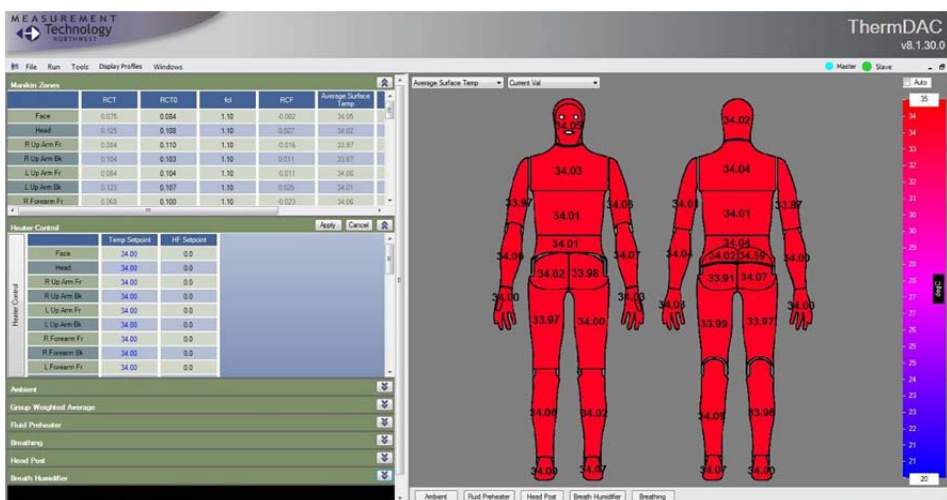


Rys. 8. Manekin termiczny *Newton*

Źródło: opracowanie własne.

Manekin *Newton* posiada funkcję ruchomych ramion, łokci, kolan i stóp ze zmienną regulowaną prędkością. Ponadto wbudowany układ umożliwia symulację wymiany ciepła z otoczeniem na drodze wymiany gazowej (oddychanie). Cały proces pomiarowy może być monitorowany w czasie rzeczywistym

przy użyciu programu komputerowego ThermDAC dla każdej z 34 stref ciała manekina (rys. 9).



Rys. 9. Program komputerowy ThermDAC, służący do sterowania manekinem

Źródło: [42].

Obok zróżnicowania funkcji manekiniów należy zwrócić uwagę na ich zmienność sylwetki. Na świecie dostępne są manekiny o sylwetce męskiej, która zgodnie z normą powinna mieścić się w 50 centylu średniej populacji męskiej. Alternatywą dla nich są manekiny damskie oraz dziecięce [43].

Zgodnie z normą PN-EN ISO 15831 [32] przez izolacyjność cieplną odzieży rozumie się różnicę temperatur między powierzchnią skóry użytkownika i otaczającą atmosferą podzieloną przez przepływający w jej wyniku, suchy strumień ciepły przypadający na jednostkę powierzchni, mierzony w kierunku gradientu temperatury, przy czym suchy strumień ciepły obejmuje strumień transportowany w wyniku przewodzenia, konwekcji i promieniowania ciepła. Strumień ten jest określany na podstawie pomiaru mocy prądu dostarczanego do poszczególnych stref grzewczych manekina w celu utrzymania stałego gradientu temperatury pomiędzy powierzchnią manekina i otaczającym manekin powietrzem i jest on odniesiony do powierzchni całego manekina  $A$ . W oparciu o przedstawioną definicję w zależności od sposobu prowadzonych obliczeń określa się następujące wskaźniki charakteryzujące izolacyjność cieplną odzieży:

- całkowitą izolacyjność cieplną odzieży,  $I_t$
- wynikową całkowitą izolacyjność cieplną odzieży,  $I_{tr}$
- podstawową izolacyjność cieplną odzieży,  $I_{cl}$
- wynikową podstawową izolacyjność cieplną odzieży,  $I_{clr}$
- efektywną izolacyjność odzieży,  $I_{cle}$
- wynikową efektywną izolacyjność odzieży,  $I_{cler}$ .



Całkowitą izolacyjność cieplną odzieży, wyrażoną w  $m^2KW^{-1}$ , oblicza się według dwóch metod modelu szeregowego i modelu równoległego, przy czym badania są prowadzone bez ruchu manekina. W modelu szeregowym stosuje się wzór (69) w postaci:

$$I_t = \sum_i f_i \left[ \frac{(T_{si} - T_a) a_i}{H_{ci}} \right], \quad (69)$$

gdzie:

$$f_i = \frac{a_i}{A} \quad (70)$$

We wzorach tych  $f_i$  jest częścią całkowitego pola powierzchni manekina  $A$ , jaką stanowi pole powierzchni  $i$ -tego segmentu  $a_i$ .  $T_{si}$  jest temperaturą powierzchni powłoki  $i$ -tego segmentu manekina, a  $T_a$  jest temperaturą powietrza wewnątrz komory klimatycznej.  $H_{ci}$  jest mocą grzejną dostarczoną do  $i$ -tego segmentu manekina. Dla modelu równoległego całkowitą izolacyjność cieplną, wyrażoną w  $m^2KW^{-1}$ , oblicza się ze wzoru:

$$I_t = \frac{\left[ \left( \sum_i f_i \cdot T_{si} \right) - T_a \right] A}{\sum_i H_{ci}}. \quad (71)$$

W przypadku obliczania wynikowej całkowitej izolacyjności cieplnej odzieży  $I_{tr}$  stosuje się analogiczne obliczenia z tym, że wielkości podstawowe wprowadzane do wzorów (69) i (71) wyznacza się przy użyciu manekina będącego w ruchu. W celu wyznaczenia podstawowej izolacyjności cieplnej odzieży należy dodatkowo przeprowadzić badania przy użyciu „nagiego” manekina w spoczynku. Dla takiego pomiaru wyznacza się wartość izolacyjności cieplnej między warstwą otaczającego powietrza a powłoką manekina oznaczoną w normie jako  $I_a$ . Dla modelu szeregowego wartość  $I_a$  wyznacza się zgodnie ze wzorem (69), a dla modelu równoległego stosuje się wzór (71). Podstawową izolacyjność cieplną  $I_{cl}$  oblicza się ze wzoru:

$$I_{cl} = I_t - \frac{I_a}{f_{cl}}. \quad (72)$$

We wzorze tym  $f_{cl}$  oznacza współczynnik pola powierzchni i stanowi stosunek pola powierzchni ubranego manekina  $A_{cl}$  do pola „nagiego” manekina. Wartość  $f_{cl}$  może być mierzona metodą fotograficzną. Zdjęcia rzutów powierzchni „nagiego” manekina są porównywane ze zdjęciami rzutów ubranego manekina wykonywanymi z tych samych sześciu kierunków. Zdjęcia rzutów powierzchni wykonuje się z sześciu kierunków: na dwóch wysokościach  $0^\circ$  (poziomo) i  $60^\circ$

i przy trzech kątach azymutalnych na każdej wysokości:  $0^\circ$  (z przodu),  $45^\circ$  i  $90^\circ$  (z profilu). Współczynnik pola powierzchni dla każdego kierunku  $f_{cli}$  wyznacza się jako:

$$f_{cli} = \frac{A_{cli}}{A_i}, \quad (73)$$

gdzie  $A_{cli}$  jest polem powierzchni rzutu ubranego manekina w  $i$ -tym kierunku, a  $A_i$  jest polem powierzchni „nagiego” manekina w  $i$ -tym kierunku. Wartość  $f_{cli}$  oblicza się jako wartość średnią z sześciu dokonanych pomiarów. Wynikową podstawową izolacyjność cieplną odzieży wyznacza się analogicznie, lecz w oparciu o wyniki otrzymane dla pomiarów dokonanych z użyciem ruchomego manekina. W celu obliczenia efektywnej izolacyjności cieplnej stosuje się wzór:

$$I_{cle} = I_t - I_a, \quad (74)$$

a dla obliczenia wynikowej efektywnej izolacyjności cieplnej stosuje się wzór w postaci:

$$I_{cler} = I_{tr} - I_{ar}, \quad (75)$$

w którym poszczególne wielkości oblicza się według wzorów (69) i (71) stosując manekin w ruchu. W przypadku braku manekina ruchomego wartość  $I_{tr}$  można obliczyć z równań empirycznych podanych w pracach [8, 44, 45] w postaci przedstawionej poniżej.

Dla ubrań, dla których podstawowa izolacyjność cieplna w warunkach statycznych mieści się w granicach  $0,6 clo < I_{cl} < 1,4 clo$  lub w granicach  $1,2 clo < I_t < 2,0 clo$ , otrzymuje się:

$$I_{tr} = e^{\left[-0,281(v_{ar}-0,15)+0,044(v_{ar}-0,15)^2-0,492v_w+0,176v_w^2\right]} I_t \quad (76)$$

W przypadku braku dostępu do manekina ruchomego, wartość  $I_{ar}$  dla manekina „nagiego”, kiedy  $I_{cl} = 0$ , można wyznaczyć stosując wzór empiryczny w postaci przedstawionej w pracy [46]:

$$I_{ar} = e^{\left[-0,533(v_{ar}-0,15)+0,069(v_{ar}-0,15)^2-0,462v_w+0,201v_w^2\right]} I_a, \quad (77)$$

gdzie  $v_{ar}$  jest względną prędkością powietrza w komorze, wyprowadzone równanie jest prawdziwe dla minimalnej prędkości wynoszącej  $0,15 m \cdot s^{-1}$  i maksymalnej wynoszącej  $3,5 m \cdot s^{-1}$ ,  $v_w$  jest prędkością ruchu manekina, dla której wartość maksymalna może wynosić  $1,2 m \cdot s^{-1}$ , a  $I_a$  dla powietrza wynosi  $0,7 clo$ . Dla ubrania bardzo lekkiego, dla którego podstawowa izolacja cieplna zawiera się w przedziale  $<0 clo-0,6 clo>$  interpolacja pomiędzy wzorem (76) i (77) została przeprowadzona w pracy [46] dając wynik w postaci wzoru:

$$I_{tr} = \frac{[(0,6 - I_{cl})I_{ar} + I_{cl}I_{tr}]}{0,6}. \quad (78)$$

Dla ubrania ciepłego, dla którego  $I_t > 2 clo$ , charakteryzującego się mniejszą przepuszczalnością powietrza równania empiryczne wyprowadzone w pracach [47, 48] przyjmują odpowiednio postać:

$$I_{tr} = e^{[(-0,0512(v_{ar}-0,4)+0,794 \times 10^{-3}(v_{ar}-0,4)^2 - 0,0639v_w)p^{0,144}]} I_t, \quad (79)$$

dla  $v_{ar}$  mieszczącego się w zakresie  $0,4 m \cdot s^{-1} - 18 m \cdot s^{-1}$  i dla  $v_w$  w zakresie  $0 m \cdot s^{-1} - 1,2 m \cdot s^{-1}$ . We wzorze tym  $p$  oznacza przewodność zewnętrznego materiału, z którego wykonana jest odzież. Powinna się ona mieścić w zakresie  $1 l \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} - 1000 l \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ . Dla warunków gdy:  $v_{ar}$  mieści się w zakresie  $0,4 m \cdot s^{-1} - 18 m \cdot s^{-1}$ ,  $v_w$  w zakresie  $0 m \cdot s^{-1} - 1,2 m \cdot s^{-1}$ , a  $p$  w zakresie  $1 l \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} - 1000 l \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$  wzór ten przyjmuje postać:

$$I_{tr} = e^{[(-0,0881(v_{ar}-0,4)+0,779(v_{ar}-0,4)^2 - 0,0317v_w)p^{0,2648}]} I_t. \quad (80)$$

Kolejnym parametrem wyznaczanym przy użyciu manekina jest oporność pary wodnej rozumiana jako stosunek gradientu ciśnienia pary wodnej w warstwie przyskórnej i w otoczeniu, i utraty strumienia utajonego ciepła parowania wynikającej z parowania części wody dążącego do wyrównania ciśnień w warstwie przyskórnej i w otoczeniu. Wartości oporności pary wodnej rozpatruje się podobnie jak w przypadku izolacyjności cieplnej z uwzględnieniem poszczególnych warstw. Rozpatrując ubiór jako układ wielowarstwowy składający się z warstwy przyskórnej, materiału lub zestawu materiałów, z których wykonana jest odzież oraz warstwy brzegowej powietrza otaczającego odzież, wyznacza się całkowity opór pary wodnej jako wartość  $R_{e,T}$ , stosując model równoległy, ze wzoru:

$$R_{e,T} = \frac{(p_{sk,s} - p_a)A}{H_{e,c}}, \quad (81)$$

gdzie  $p_{sk,s}$  jest średnim ciśnieniem pary wodnej nasyconej w temperaturze powłoki manekina,  $p_a$  – ciśnieniem pary wodnej w powietrzu w temperaturze powietrza,  $H_{e,c}$  – całkowitą mocą elektryczną pobraną celem utrzymania stałej temperatury manekina będącego w spoczynku podczas wykonywania pomiarów. Wartość ta może zostać określona również w oparciu o badania całkowitej izolacyjności cieplnej  $I_{cl}$  oraz wartości  $i_m$  wskaźnika przenikania pary wodnej według zależności:

$$R_{e,T} = \frac{I_t}{i_m L} = \frac{0,06}{i_m} \left( \frac{i_a}{f_{cl}} + I_{cl} \right), \quad (82)$$

gdzie stała Lewisa,  $L$  wynosi  $16,5 \text{ KW}^{-1}$ . Typowe wartości wskaźnika przenikania pary wodnej zestawiono w Aneksie C normy PN-EN ISO 9920:2007 (E) [8]. Dla warstwy powietrza wskaźnik przenikania pary wodnej wynosi 0,5, dla nieprzewodnej odzieży pokrywającej całe ciało wartość ta jest bliska zeru, a dla typowych zestawów dwu- i trójwarstwowych przyjmuje wartość 0,38. W przypadku gdy manekin jest w ruchu ze wzoru (81) oblicza się wynikowy całkowity opór pary wodnej, podstawiając odpowiednie wartości wyznaczone w tym eksperymencie. Celem określenia podstawowego oporu pary wodnej odzieży  $R_{e,cl}$  wyznaczyć należy opór pary wodnej „nagiego” manekina  $R_{e,a}$ , a następnie przeprowadzić obliczenia korzystając ze wzoru:

$$R_{e,cl} = R_{e,T} - \frac{R_{e,a}}{f_{cl}}, \quad (83)$$

gdzie  $f_{cl}$  określa się zgodnie z normą ISO 9920:2007 (E) [8]. W przypadku gdy eksperyment prowadzony jest z użyciem ruchomego „nagiego” manekina wyznacza się wartość wynikowego podstawowego oporu pary wodnej odzieży  $R_{e,cl,r}$  wykorzystując równanie (83) i podstawiając stosowne dane uzyskane przy prowadzeniu eksperymentu z ruchomym manekinem. Redukcja wartości oporu pary wodnej w wyniku oddziaływania strumienia powietrza jest skorelowana z redukcją izolacyjności cieplnej. Równanie empiryczne wiążące obie wielkości wprowadzono w pracach [49] w postaci:

$$R_{e,T,r} = (0,3 - 0,5 \text{corr}I_t + 1,2 \text{corr}I_t^2) R_{e,T}, \quad (84)$$

gdzie  $\text{corr}I_t$  jest współczynnikiem korekcji dla całkowitej izolacji cieplnej. Wartość  $R_{e,T,r}$  może zostać również wyliczona bezpośrednio przy użyciu empirycznego wzoru wprowadzonego w pracy [49] zgodnie ze wzorem:

$$R_{e,T,r} = e^{[-0,468(v_{ar}-0,15)+0,080(v_{ar}-0,15)^2-0,874v_w+0,358v_w^2]} R_{e,T}. \quad (85)$$

Przy użyciu manekina w ruchu uzyskuje się wartość efektywnego wynikowego oporu pary wodnej odzieży  $R_{e,cl,r}$ , jeżeli obliczenia prowadzone są zgodnie ze wzorem:

$$R_{e,cl,r} = R_{e,T,r} - R_{e,a,r}. \quad (86)$$

Przykłady podstawowej izolacyjności cieplnej dla różnego rodzaju ubiorów zestawiono w normie ISO 9920:2009 (E), [8] w tabeli A1. Podane wartości w tabeli wyznaczono przy użyciu manekina będącego w stanie spoczynku, przy prędkości powietrza  $< 0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; tabele A2-A10 wymienionej normy zawierają bardziej komplementarne wyniki badań odnoszące się do masy noszonego ubioru dla rozmiaru 52 (pomijana jest masa obuwia), wartości współczynników pola powierzchni  $f_{cl}$ , podstawowej izolacyjności cieplnej i całkowitej izolacyjności

cieplnej. Dane zawarte w Aneksie A wymienionej normy są szczególnie użyteczne przy dokonywaniu doboru zestawu odzieży stanowiącej środek ochrony indywidualnej, w przypadku gdy znana jest wartość wymaganej izolacyjności. Aneks B zawiera wartości podstawowej izolacyjności cieplnej  $I_{cl}$  poszczególnego rodzaju odzieży i wartości efektywnej izolacyjności cieplnej elementów ubioru  $I_{cle}$ . W przypadku znajomości izolacyjności cieplnej poszczególnych elementów ubioru  $I_{cle}$  można wyznaczyć całkowitą izolacyjność ubioru zgodnie ze wzorem:

$$I_{cl} = 0,161 + 0,835 \sum I_{cle}, \quad (87)$$

lub w przybliżeniu zgodnie ze wzorem  $I_{cl} = \sum I_{cle}$ , dla zakresu podstawowej izolacyjności odzieży od 0,2 *clo* do 1,6 *clo*. W celu ilustracji przedstawionych rozważań zastosowano omówioną metodykę badań do oceny właściwości biofizycznych odzieży ochronnej dla strażaków.

## 1.8. Ocena właściwości biofizycznych odzieży ochronnej dla strażaków

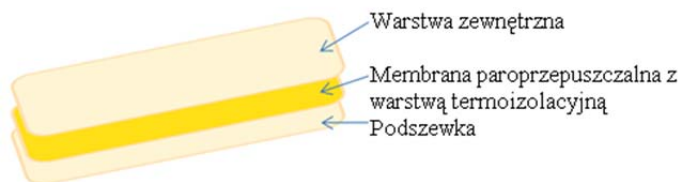
Ocenę właściwości biofizycznych odzieży ochronnej dla strażaków przeprowadzono w dwóch etapach zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 4. Etap pierwszy obejmował ocenę materiałów odzieżowych. Badania wykonano przy użyciu stanowiska pomiarowego zbudowanego przez firmę Measurement Technology Northwest o nazwie Sweating Hotplate 8.2. Pomiar oporu cieplnego i oporu pary wodnej przeprowadzono w warunkach ustalonej równowagi, dla płaskich wyrobów włókienniczych, jednowarstwowych oraz wielowarstwowych układów materiałowych stosowanych w odzieży, zgodnie z normą PN-EN ISO 11092:2014-11 [31]. Pomiar oporu cieplnego był wykonywany przy temperaturze płyty wynoszącej 35°C i temperaturze otoczenia 20°C oraz wilgotności względnej powietrza 65%. Pomiar oporu pary wodnej wykonywane były przy temperaturze płyty wynoszącej 35°C i temperaturze otoczenia 35°C oraz wilgotności względnej powietrza 40%. Wymagania te były spełnione w trakcie pomiaru, wewnątrz komory klimatycznej, dla strumienia powietrza przepływającego nad próbką z prędkością 1  $m \cdot s^{-1}$ . W drugim etapie analizowano właściwości odzieży wykonanej z układów materiałowych zbadanych w pierwszym etapie zgodnie z metodyką opisaną w normie PN-EN ISO 15831:2008 [32]. Badania przeprowadzono przy użyciu manekina firmy MNTW o nazwie *Newton*. Manekin został umieszczony w komorze wielkogabarytowej, w której temperatura otoczenia wynosiła 20°C, wilgotność względna powietrza osiągała wartość 50% a prędkość przepływającego powietrza wynosiła 0,4  $m \cdot s^{-1}$ . Temperatura powierzchni manekina w każdej jego strefie była stała i wynosiła 34°C. Badania prowadzono przy użyciu manekina w bezruchu oraz poruszającego się z prędkością 45 *kroków*·*min*<sup>-1</sup>. Wyznaczono wartości efektywnej izolacyjności cieplnej odpowiadającej aktywności spoczynkowej zgodnie ze wzorem (74) oraz wynikowej efektywnej izolacyjności cieplnej, odpowiadającej aktywności

ruchowej zgodnie ze wzorem (75). W trakcie pomiaru monitorowano warunki zewnętrzne i temperaturę każdej ze stref. Badania prowadzono w ustalonych warunkach przepływu strumienia ciepła. Dla każdej ze stref rejestrowano następujące wskaźniki: średnią temperaturę powierzchni, °C, przepływ strumienia ciepła,  $W \cdot m^{-2}$ , wydatek pary wodnej,  $ml \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$  oraz parametry otoczenia: średnią temperaturę otoczenia, wilgotność względną powietrza, prędkość przepływu powietrza. W przypadku uruchomionej opcji oddychania dodatkowo rejestrować można: objętość respiracji,  $l$ , prędkość oddechu,  $min^{-1}$ , wyliczony przepływ wdechu i wydechu,  $l \cdot min^{-1}$ , temperaturę powietrza przy wydechu, °C, wilgotność powietrza przy wydechu, %, tryb oddychania (przez nos, przez usta).

### 1.8.1. Charakterystyka materiału badawczego

Do badań wykorzystano układy materiałów jednowarstwowych oraz trójwarstwowych (rys. 10) składających się z:

- warstwy zewnętrznej w postaci tkaniny,
- wkładu wodoszczelno-paroprzepuszczającego z warstwą termoizolacyjną,
- podszewki.



Rys. 10. Układ materiałów trójwarstwowych

Źródło: opracowanie własne.

Przedstawiony układ materiałowy został wykorzystany do wytworzenia ŚOI w postaci trzech kompletów odzieży strażackiej składającej się z dwóch elementów: kurtki i spodni. Poszczególne warstwy układu połączono w sposób trwały. Szwy membrany podklejono taśmą zapewniającą wodoszczelność ubrania. Wszystkie szwy, wykonane w ubraniu w miejscach szczególnie narażonych na uszkodzenia mechaniczne, zabezpieczono przed pruciem szwem powrotnym i rygłem. Wszystkie komplety odzieży strażackiej dostarczone zostały przez firmę Arlen. Ubrania charakteryzowały się zróżnicowanym składem surowcowym. Ubranie oznaczone UTP-6 zostało uszyte z:

- tkaniny – Nomex Delta T (75% Nomex, 23% Kevlar, 2% P140 antyelektrostatyczne włókno węglowe), pełniącej funkcję warstwy zewnętrznej,
  - tkaniny aramidowej z membraną na bazie poli (tetrafluoroetyleny) Gore-Tex Fireblocker N2LY, jako warstwy chroniącej przed wilgocią,
  - 100% włókniny aramidowej pikowanej z podszewką, jako warstwy izolacyjnej.
- Ubranie oznaczone UTP-7 Phoenix składało się z:

tkaniny – Nomex Delta T (75% Nomex, 23% Kevlar, 2% P140 antyelektrostatyczne włókno węglowe),

- tkaniny aramidowej z membraną na bazie poli(tetrafluoroetyleny), BAPA 55, jako warstwy chroniącej przed wilgocią,
- 100% włókniny aramidowej pikowanej z podszewką, jako warstwy izolacyjnej.

Ubranie oznaczone UTP-9 Gold zbudowane było z:

- tkaniny AU9200 (78% para-aramid, 20% meta-aramid, 2% włókna antyelektrostatyczne),
- tkaniny CX 210 (100% aramid) z membraną ePTFE/Pu Bi-component, jako warstwy chroniącej przed wilgocią,
- włókniny CZ 703 100% meta-aramid pikowanej z podszewką, jako warstwy izolacyjnej.

Widok ogólny użytej do badań odzieży przedstawiono na rysunku 11.



Rys. 11. Zestaw odzieży strażackiej wytworzonej przez Arlen:

a) UTP-6, b) UTP-7 Phoenix, c) UTP-9 Gold

Źródło: opracowanie własne.

Jako odzież spodnią użyto bielizny trudnopalnej składającej się z koszulki z długim rękawem i długich spodni wykonanej z 50% meta-aramidu i 50% trudnopalnych włókien wiskozowych o nazwie Wiskoza FR. Bielizna ta posiada certyfikat na zgodność z p. 6.2.1, 6.3, 6.9, 7.2 i 7.3, normy EN ISO 11612 [50] nr jednostki 1475.

### **1.8.2. Wyniki badań właściwości biofizycznych materiałów przeznaczonych na odzież ochronną dla strażaków**

Właściwości biofizyczne przykładowych materiałów przeznaczonych na odzież dla strażaków zbadano zgodnie z metodyką omówioną w rozdziale 1.7.1, wyznaczając wartości oporu cieplnego ( $R_c$ ) i oporu pary wodnej ( $R_e$ ). Wyniki badań zamieszczono w tabeli 11 oraz na rysunkach 12 i 13.

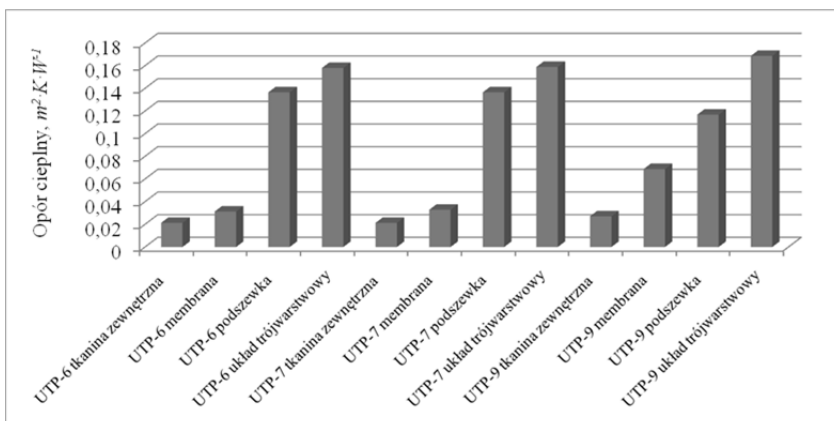
Tabela 11. Wartości oporu cieplnego i oporu pary wodnej układów materiałowych przeznaczonych na odzież strażacką

Lp.	Materiał	Grubość, mm	Masa pow., $g \cdot m^{-2}$	Przepuszczal- ność powie- trza, $mm \cdot s^{-1}$	Opór cieplny, $m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$	Opór pary wodnej, $m^2 \cdot Pa \cdot W^{-1}$
układy jednowarstwowe						
1	UTP-6 Tkanina zewnątrzna	0,42	210,11	117,67	0,021	8,083
2	UTP-6 membrana	0,72	155,17	1,310	0,031	6,573
3	UTP-6 podszywka	2,34	290,97	551,71	0,136	16,759

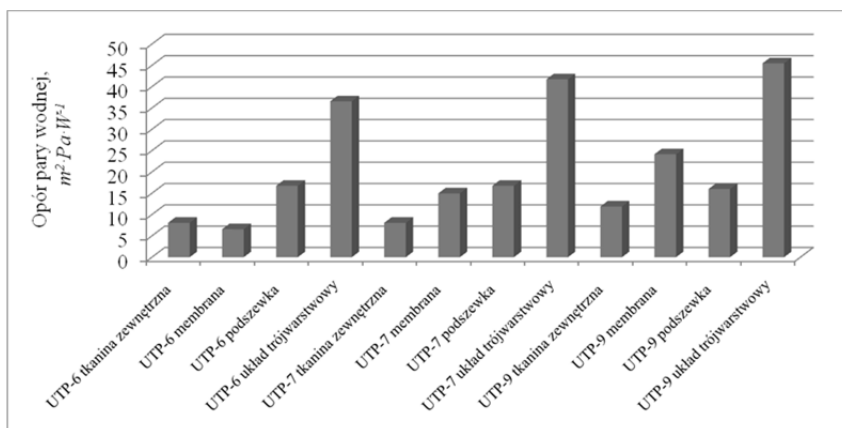
4	UTP-7 Phoenix tkanina zewnątrzna	0,42	210,11	117,67	0,021	8,083
5	UTP-7 Phoenix membrana	0,54	98,87	1,41	0,033	14,978
6	UTP-7 Phoenix podszywka	2,34	290,97	551,71	0,137	16,759
7	UTP-9 Gold tkanina zewnątrzna	0,44	219,53	115,33	0,027	11,907
8	UTP-9 Gold membrana	1,74	245,38	6,47	0,069	24,158
9	UTP-9 Gold podszywka	2,26	280,90	589,50	0,117	15,999
układy trójwarstwowe						
10	UTP-6	3,48	599,95	5,72	0,158	36,576
11	UTP-7 Phoenix	3,30	656,25	5,98	0,159	41,729
12	UTP-9 Gold	4,44	745,81	8,66	0,169	45,491

W omówionych ubraniach włókniny pikowane razem z podszywką stanowią warstwę termoizolacyjną. Konstrukcja warstwy termoizolacyjnej ma za zadanie zatrzymać między włóknami jak najwięcej powietrza, gdyż jest ono jednym z najlepszych izolatorów ciepła. Układy trzywarstwowe zawierające membranę miały na celu wytworzenie materiałów oddychających, paroprzepuszczalnych, chroniących przed wilgocią. Wielkość oporu przenikania pary wodnej wpływa na komfort użytkowania odzieży. Niska jego wartość ułatwia odparowanie potu i wydalenia go na zewnątrz.





Rys. 12. Wyniki badań oporu cieplnego układów jedno- i trójwarstwowych  
Źródło: opracowanie własne.



Rys. 13. Wyniki badań oporu pary wodnej układów jedno- i trójwarstwowych  
Źródło: opracowanie własne.

Przetawione wyniki pomiarów wskazują na zróżnicowane właściwości biofizyczne składu materiałowego poszczególnych wariantów odzieży ochronnej. Tkanina zewnętrzna UTP-9 Gold charakteryzuje się nieznacznie wyższym oporem cieplnym w stosunku do tkaniny użytej w odzieży UTP-6 i UTP-7 Phoenix, natomiast znaczne różnice, przekraczające 30% zauważa się w przypadku analizy wartości oporu pary wodnej. Również membrana zastosowana w odzieży UTP-9 Gold posiada znacznie większy opór pary wodnej oraz prawie dwukrotnie większą wartość oporu cieplnego w stosunku do membran stosowanych w dwóch pozostałych wariantach odzieży. Można się spodziewać, iż właściwości biofizyczne odzieży UTP-9 Gold będą odbiegały od dwóch pozostałych analizowanych wariantów. Znajomość oporu cieplnego materiałów, z których wytworzono odzież nie umożliwia klasyfikacji właściwości ergonomicznych odzieży jako środka ochron osobistych, klasyfikacja ta została jedynie znormalizowana w przypadku oporu pary wodnej całkowitego zestawu materiałowego.

W normie PN-EN 343:2008 – Odzież ochronna – Ochrona przed deszczem [51] zamieszczono tabelę przedstawiającą kategorie odzieży roboczej w zależności od oporu pary wodnej zestawu materiałów, z którego jest wykonana (patrz tabela 12). W normie tej znaleźć można również maksymalne zalecane czasy ciągłego noszenia odzieży (bez warstwy izolującej ciepłnie). Najwyższy komfort użytkownika zapewnia odzież kategorii 3 (o najmniejszym współczynniku oporu pary wodnej), która może być użytkowana bez ograniczeń czasowych nawet w temperaturze otoczenia 20°C. Odzież kategorii 1 nie nadaje się do długotrwałego użytkowania. Czas użytkowania i związany z nim komfort użytkownika zależą od temperatury otoczenia oraz intensywności pracy (wydatku energetycznego pracownika). Czasy podane w tabeli są słuszne przy następujących założeniach: średni wydatek energetyczny pracownika  $M = 150 \text{ W/m}^2$ , wilgotność względna otoczenia 50%, prędkość wiatru  $v_a = 0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Tabela 12. Kategorie odzieży ochronnej w zależności od oporu pary wodnej ( $R_e$ ) materiału, z którego jest wykonana. Zalecany maksymalny czas ciągłego noszenia odzieży ochronnej bez warstwy izolującej ciepłnie

Temperatura otoczenia [°C]	Kategorie przepuszczalności pary wodnej		
	1	2	3
	$R_e \geq 40$	$20 < R_e \leq 40$	$R_e \leq 20$
	$t, \text{ min}$	$t, \text{ min}$	$t, \text{ min}$
25	60	105	205
20	75	250	bez ograniczeń

### 1.8.3. Wyniki badań właściwości biofizycznych odzieży ochronnej dla strażaków

Badania właściwości biofizycznych wybranego asortymentu odzieży ochronnej dla strażaków prowadzono przy użyciu 34-strefowego manekina o nazwie *Newton* w stanie spoczynku i wtedy wyznaczono całkowitą izolacyjność cieplną  $I_t$  i efektywną izolacyjność cieplną ( $I_{cle}$ ) oraz w stanie ruchu, wyznaczając wynikową całkowitą i wynikową efektywną izolacyjność cieplną ( $I_{cler}$ ). Wyniki badań zestawiono w tabelach 13-14.

Tabela 13. Charakterystyka izolacyjności cieplnej białizny i nagiego manekina

Rodzaj obiektu	Temperatura otoczenia/ wilgotność wzgl. powietrza, °C/%	Prędkość powietrza, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	Całkowita izolacyjność cieplna, $\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$	Wynikowa całkowita izolacyjność cieplna, $\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$
Bielizna zimowa	+20/50	0,4	0,161	0,137
Graniczna warstwa powietrza określona w oparciu o pomiar gołego manekina	+20/50	0,4	0,087	0,071

Tabela 14. Wartości izolacyjności cieplnej dla odzieży ochronnej dla służb ratowniczych KSRG, badanej w założonych warunkach klimatycznych

Rodzaj badanego obiektu	Temperatura otoczenia/ wilgotność względna powietrza, $^{\circ}C \cdot \%^{-1}$	Efektywna izolacyjność cieplna odzieży i bielizny ( $I_{cle}$ ), $m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$	Efektywna izolacyjność cieplna samej odzieży, $m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$	Wynikowa efektywna izolacyjność cieplna odzieży i bielizny ( $I_{cler}$ ), $m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$	Wynikowa efektywna izolacyjność cieplna samej odzieży, $m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$
UTP-6	+20/50	0,449	0,376	0,312	0,246
UTP-7 Phoenix	+20/50	0,499	0,425	0,312	0,246
UTP-9 Gold	+20/50	0,531	0,457	0,326	0,260

W przypadku gdy odzież ochronna ma chronić pracownika przed zimnem, to zgodnie z normą PN-EN 342/AC:2008 [52] wartość wynikowej efektywnej izolacyjności cieplnej  $I_{cler}$  powinna wynosić przynajmniej  $0,310 m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$ . Norma ta definiuje minimalne wartości efektywnej i wynikowej efektywnej izolacyjności cieplnej odzieży ochronnej, która ma zapewnić komfort fizjologiczny użytkownika pracującego w danej temperaturze przez określony czas w zależności od jego poziomu aktywności ruchowej. W tabeli 15 przedstawiono przykładowe poziomy efektywnej izolacyjności cieplnej odzieży dla stojącego użytkownika, a w tabeli 16 wartości wynikowej efektywnej izolacyjności cieplnej odzieży dla użytkownika poruszającego się i wykazującego słabą lub umiarkowaną aktywność ruchową. Dla każdego poziomu izolacyjności podana została najniższa temperatura, w której człowiek w tej odzieży może pracować osiem godzin, zachowując bilans cieplny oraz najniższa temperatura, w której może pracować jedną godzinę bez wychłodzenia organizmu. Podane wartości w tabelach 15 i 16 określono dla temperatury powietrza równej średniej temperaturze radiacyjnej, wilgotności względnej powietrza wynoszącej około 50%, prędkości ruchu powietrza zawartej w przedziale pomiędzy  $0,3-0,5 m \cdot s^{-1}$  i prędkość poruszającego się manekina wynoszącej około  $1,0 m \cdot s^{-1}$  [26].

Tabela 15. Izolacyjność cieplna odzieży  $I_{cle}$  (badana dla manekina nieruchomego) i warunki temperatury otoczenia dla zachowania bilansu cieplnego przy różnych czasach ekspozycji [52]

Efektywna izolacyjność $I_{cle}, m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$	Aktywność stojącego użytkownika $75 W \cdot m^{-2}$	
	8 h	1 h
0,310	11	-2
0,390	7	-10
0,470	3	-17
0,540	-3	-25
0,620	-7	-32

Tabela 16. Izolacyjność cieplna odzieży  $I_{cler}$  (badana dla manekina poruszającego się) i warunki temperatury otoczenia dla zachowania bilansu cieplnego przy różnych poziomach aktywności i czasach ekspozycji [52]

Wynikowa efektywna izolacyjność $I_{cler}, m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$	Aktywność ruchowa użytkownika			
	lekka $115 W \cdot m^{-2}$		średnia $170 W \cdot m^{-2}$	
	8 h	1 h	8 h	1 h
0,310	-1	-15	-19	-32
0,390	-8	-25	-28	-45
0,470	-15	-35	-38	-58
0,540	-22	-44	-40	-70
0,620	-29	-54	-60	-83

Zarówno efektywna izolacyjność cieplna, jak i wynikowa efektywna izolacyjność cieplna zgodnie z normą PN-EN 342/AC:2008 [52] wyznaczone są z odzieżą referencyjną spełniającą wymagania tablicy A.1 tej normy, w której określono, że podkoszulek z długim rękawem oraz długie kalesony muszą się charakteryzować oporem cieplnym na poziomie  $0,06 m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$ . Efektywną izolacyjność cieplną wyznacza się dla aktywności stojącego użytkownika ( $75 W \cdot m^{-2}$ ), zaś wynikową efektywną izolacyjność cieplną wyznacza się dla aktywności ruchowej użytkownika (min.  $115 W \cdot m^{-2}$ ) [52].

#### 1.8.4. Wnioski odnoszące się do oceny właściwości biofizycznych odzieży ochronnej dla strażaków

Analizując wyniki badań oporu pary wodnej zestawów materiałowych można stwierdzić, że wytworzone układy trójwarstwowe oznaczone symbolami UTP-7 Phoenix i UTP-9 Gold spełniają wymagania dla wyrobów przeznaczonych na odzież ochronną w kategorii 1, zaś układy trójwarstwowe oznaczone symbolem UTP-6 spełniają wymagania dla wyrobów przeznaczonych na odzież ochronną w kategorii 2, zgodnie z normą PN-EN 343:2008 – Odzież ochronna – Ochrona przed deszczem [51]. Zróżnicowane właściwości ochronne uzyskano dzięki zastosowaniu membran o zróżnicowanej paroprzepuszczalności. Podobną zależność zaobserwowano również w przypadku analizy izolacyjności cieplnej badanych wariantów odzieży. Wyniki przedstawione w tabelach 11 i 14 wskazują, iż na wartość efektywnej izolacyjności cieplnej badanych wariantów ma wpływ skład materiałowy odzieży. Odzież wykonana przez firmę Arlen posiada wkład wodoszczelno-paroprzepuszczający z warstwą termoizolacyjną, dzięki czemu efektywna izolacyjność cieplna oraz wynikowa efektywna izolacyjność cieplna badana wraz z bielizną spełnia pierwszy próg wymagań ergonomicznych zdefiniowanych wg normy PN-EN 342/AC:2008, Odzież ochronna – Zestawy odzieży i wyroby odzieżowe chroniące przed zimnem. Kolejnym krokiem w badaniach nad nowymi materiałami, których konstrukcja może wpływać na właściwości biofizyczne, jest rozwój narzędzi służących do symulacji właściwości płaskich wyrobów włókienniczych zależnych od właściwości stosowanych

włókien i budowy wyrobu. Zagadnienia te będą przedmiotem rozważań przedstawionych w dalszych dwóch rozdziałach.

## **1.9. Modelowanie i analiza zjawisk transportu energii w tekstyliach**

### **1.9.1. Wstęp**

Przedstawione w opracowaniu wskazówki dotyczące projektowania modeli geometrycznych tekstyliów (tkanin i dzianin) oraz metod symulowania w nich zjawisk transportu energii są skierowane do użytkowników, którym znane są podstawy obsługi oprogramowania marki *SolidWorks*. Aplikacja umożliwia precyzyjne projektowanie złożonych obiektów trójwymiarowych oraz symulowanie w nich zjawisk zaliczanych do różnych dziedzin fizyki, takich jak: kinematyka, dynamika czy termodynamika. Modelowanie zjawisk fizycznych opiera się na metodzie elementów skończonych (zaawansowanej metodzie rozwiązywania układów równań różniczkowych, opierającej się na podziale dziedziny na skończone elementy, dla których rozwiązanie jest przybliżane przez konkretne funkcje; rzeczywiste obliczenia są przeprowadzane tylko dla węzłów tego podziału). Etap projektowania modeli tekstyliów został wykonany w podstawowym module oprogramowania – *SolidWorks Standard*, natomiast do wykonania symulacji zjawisk transportu energii został użyty moduł *SolidWorks Flow Simulation*. Oba modele geometryczne pojedynczych warstw: tkaniny i dzianiny uwzględniają ich grubość, spłot, długość przędzy oraz materiał z jakiego zostały wykonane. Modele nie uwzględniają sprężystości nitki ani sił tarcia między stykającymi się ze sobą układami: wątku i osnowy. Pojedyncze włókna tworzące nitki zostały zastąpione monofilamentem, przez co w modelach nie zostały uwzględnione takie czynniki, jak ilość włókien, ich długości czy skręt w nitkach. Z uwagi na specyfikę oprogramowania, które pozwala na projektowanie tych samych obiektów oraz modelowanie w nich tych samych zjawisk na wiele sposobów, w opracowaniu zostały przedstawione te najbardziej intuicyjne.

### **1.9.2. Przykłady modeli geometrycznych płaskich wyrobów włókienniczych**

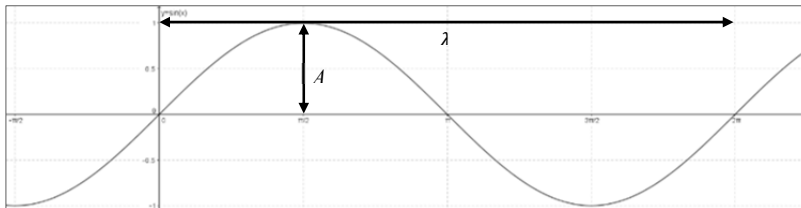
Moduł *SolidWorks Flow Simulation* umożliwia symulację transportu ciepła przez wyroby o zdefiniowanej geometrii. Dlatego też pierwszym krokiem jest odzwierciedlenie geometrii projektowanego wyrobu włókienniczego. Symulacja geometrii projektowanego wyrobu może zostać dokonana przy użyciu modułu *SolidWorks Standard*. W przypadku tkanin w przeprowadzonych symulacjach ilustrujących możliwości programu *SolidWorks* założono, iż tkanina jest zbudowana z wiotkiej nierozciągliwej nitki, która nie stanowi oporu na zginanie i skręcanie. Nitka w postaci homogenicznego monofilamentu posiada kołowy przekrój poprzeczny, który nie zmienia swojego kształtu.

Pierwszym etapem tworzenia trójwymiarowego modelu tkaniny jest wykonanie dwuwymiarowego szkicu, ilustrującego przebieg przędzy osnowy. Założono, iż przebieg ten ma kształt krzywej zbliżonej do kształtu fali sinusoidalnej w postaci:

$$y(x) = A \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \quad (88)$$

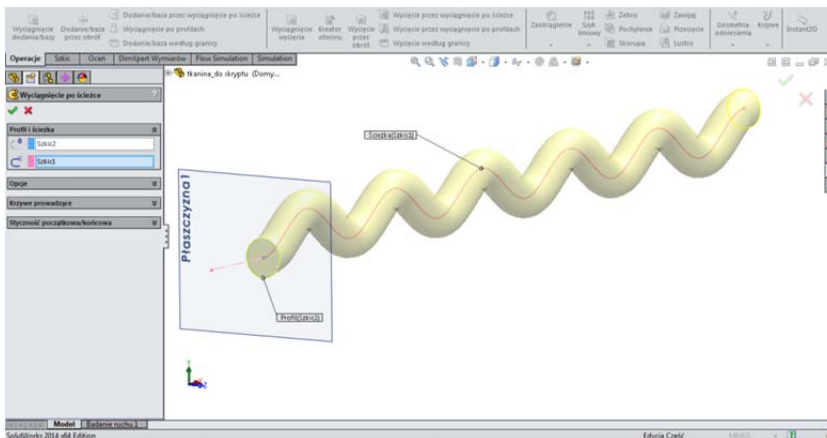
o ściśle określonych wartościach: długości  $\lambda$ , amplitudy  $A$  i fazie  $2\pi x/\lambda$ . Parametry te zależą od splotu tkaniny.

Poprzez zdefiniowanie, dla powyższej funkcji: długości, amplitudy, fazy oraz punktów: początkowego i końcowego, można dokładnie określić długość przędzy osnowy. Obraz symulacji nitki osnowy przy przyjętych założeniach przedstawiono na rysunku 15.



Rys. 14. Model przebiegu nitki osnowowych w tkaninie o równaniu (88)

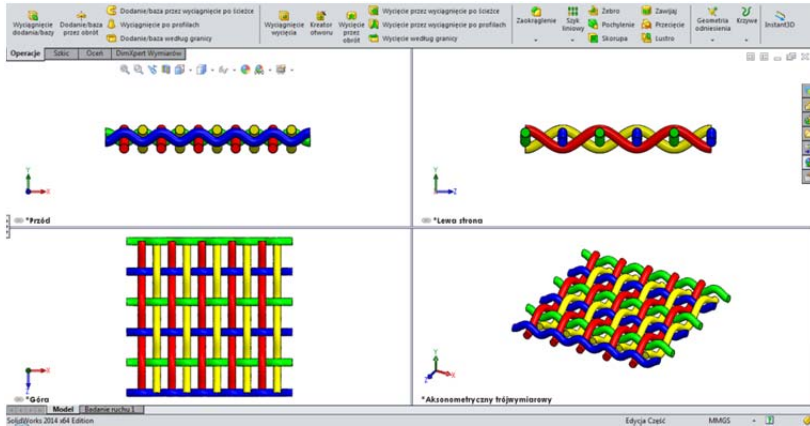
Źródło: opracowanie własne.



Rys. 15. Efekt zastosowania operacji *Wyciągnięcia po ścieżce* w celu otrzymania odpowiedniej grubości przędzy w osnowie

Źródło: opracowanie własne.

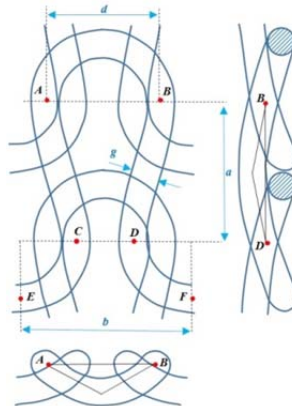
Analogicznie zaprojektowano przebieg nitki wątku. Uzyskany model geometrii tkaniny dla splotu płóciennego przykładowo zilustrowano na rysunku 16.



Rys. 16. Trójwymiarowy model tkaniny o splocie płóciennym

Źródło: opracowanie własne.

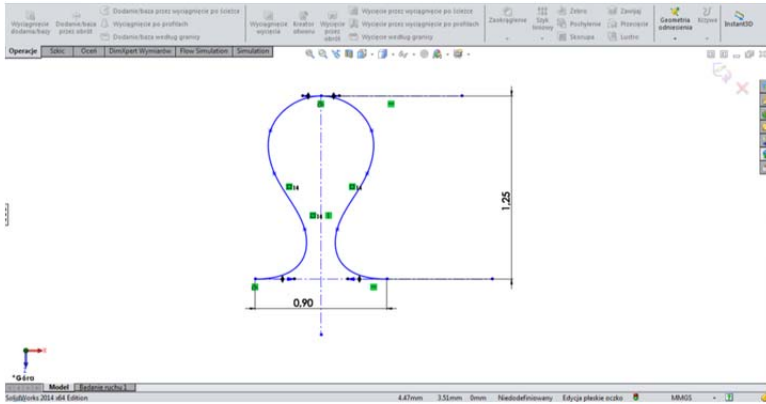
Badania nad modelem geometrycznym dzianiny rozpoczęły się w latach 40. XX w. Zgodnie z jednym z powstałych modeli, autorstwa Dalidovica [53], układ przędzy w dzianinie można opisać za pomocą układu półokręgów i odcinków prostych (rys. 17).



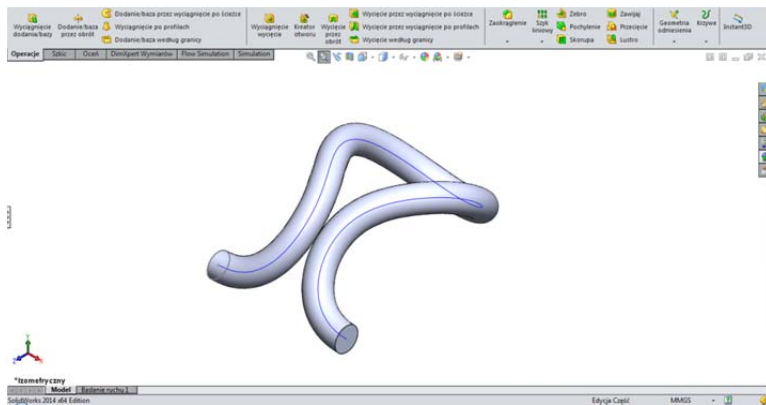
Rys. 17. Model oczka dzianiny wg modelu Dalidovica

Źródło: [53].

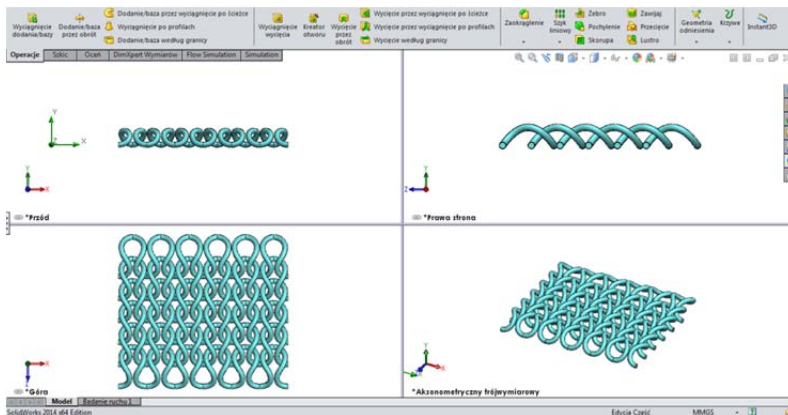
Pierwszym etapem tworzenia trójwymiarowego modelu dzianiny jest wykonanie dwuwymiarowego szkicu, ilustrującego przebieg nitki w pojedynczym oczku. Jest to możliwe z zastosowaniem krzywych NURBS. Widok szkicu oczka zaprojektowanego zgodnie z tą metodą przedstawiono na rysunku 18, widok trójwymiarowego modelu oczka na rysunku 19, a widok modelu dzianiny na rysunku 20.



Rys. 18. Szkic oczka dzianiny  
Źródło: opracowanie własne.



Rys. 19. Trójwymiarowy model oczka uzyskany w wyniku zastosowania operacji *Wyciągnięcia po ścieżce*  
Źródło: opracowanie własne.



Rys. 20. Trójwymiarowy model dzianiny rządkowej o splecie lewo prawym  
Źródło: opracowanie własne.



Wykonany model tkaniny i dzianiny może być w łatwy sposób modyfikowany, bez konieczności projektowania go od początku. Wszystkie wymiary definiowane w trakcie projektowania pierwotnej wersji modelu (np.: długość przędzy, grubość przędzy, odległość między poszczególnymi nitkami osnowy i wątku) można zmienić, modyfikując szkice lub operacje na szkicach i obiektach trójwymiarowych. Po wprowadzonych zmianach program automatycznie przebudowuje cały projekt badanego obiektu.

### 1.9.3. Symulacje zjawisk transportu energii w tekstyliach

#### 1.9.3.1. Podstawy fizyczne symulacji transportu ciepła

##### Transport ciepła w płynach

Tkaniny i dzianiny są płaskimi wyrobami włókienniczymi złożonymi z wzajemnie połączonych układów nitek. Nitki są zbudowane z pojedynczych włókien, między którymi występują wolne przestrzenie, wypełnione przez płyn: gaz lub ciecz. W związku z tym transport ciepła w tkaninie i dzianinie odbywa się zarówno poprzez włókna (ciało stałe), jak i powietrze (gaz). Transport ciepła w płynach opisuje poniższe równanie zachowania energii:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[ \rho \left( h + \frac{u^2}{2} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \rho u_i \left( h + \frac{u^2}{2} \right) \right] = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \mu_j (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i \right] + \frac{\partial p}{\partial t} - \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho d + S_i u_i + Q_H, \quad (89)$$

gdzie:  $\rho$  – gęstość płynu,  $h$  – entalpia płynu,  $u$  – prędkość płynu,  $\tau$  – tensor lepkości płynu,  $\tau^R$  – tensor naprężeń Reynoldsa,  $q$  – gęstość strumienia ciepła,  $d$  – współczynnik rozpraszania energii kinetycznej płynu,  $S_i = S_i^{porous} + S_i^{gravity} + S_i^{rotation}$  – siła zewnętrzna przypadająca na jednostkę masy płynu, wynikająca z porowatości ośrodka ( $S_i^{porous}$ ), wyporności ośrodka ( $S_i^{gravity} = -\rho g_i$ ) oraz ruchu obrotowego ośrodka względem układu współrzędnych ( $S_i^{rotation}$ ),  $Q_H$  – ciepło właściwe płynu przypadające na jednostkę objętości. Indeksy dolne oznaczają sumowanie po współrzędnych przestrzennych.

Gęstość strumienia ciepła opisuje następujące równanie:

$$q_i = \left( \frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{\sigma_c} \right) \frac{\partial h}{\partial x_i}; \quad i = 1, 2, 3, \quad (90)$$

gdzie:

$$\mu_t = \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon}. \quad (91)$$

Stała  $C_\mu$  jest wyznaczana eksperymentalnie i wynosi  $C_\mu = 0,09$ , natomiast  $\sigma_c = 0,9$ . Powyższe równania mają zastosowanie zarówno w przypadku przepływu laminarnego jak i turbulentnego. Parametry:  $k$  i  $\mu_t$  wynoszą zero dla przepływu laminarnego.

### **Przewodnictwo cieplne w ciałach stałych**

Zjawisko przewodnictwa cieplnego w anizotropowym ciele stałym jest opisane następującym równaniem:

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \lambda_i \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + Q_H, \quad (92)$$

gdzie  $e = cT$  ( $c$  – ciepło właściwe). W przypadku ośrodka izotropowego tensor przewodnictwa cieplnego  $T$  ma postać macierzy diagonalnej, a wartości własne spełniają warunek:  $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda$ .

### **Promieniowanie cieplne w ciałach stałych**

Powierzchnie ciał mogą wymieniać energię promieniowania cieplnego poprzez emisję, absorpcję oraz odbicie. Ilość ciepła wypromieniowanego przez powierzchnię  $Q_T^{out}$  jest opisana następującym równaniem:

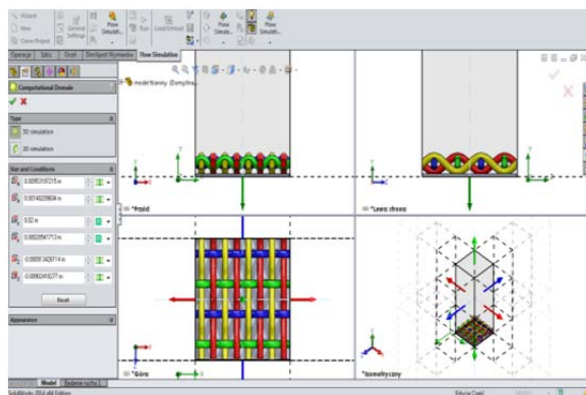
$$Q_T^{out} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \cdot A + (1 - \varepsilon) \cdot Q_T^{in}, \quad (93)$$

gdzie  $\varepsilon$  jest emisyjnością powierzchni,  $\sigma$  – stałą Stefana-Boltzmann,  $T$  – temperaturą powierzchni ( $\varepsilon\sigma T^4$  jest strumieniem ciepła wypromieniowanym przez pole tej powierzchni,  $A$  zgodnie z prawem Stefana-Boltzmann), natomiast  $Q_T^{in}$  – ilością ciepła zaabsorbowaną przez powierzchnię.

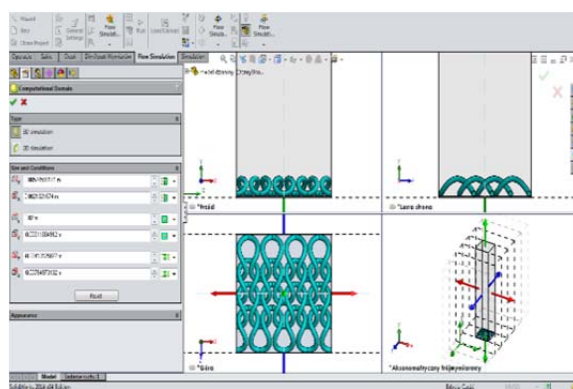
#### **1.9.3.2. Podstawy modelowania zjawisk fizycznych**

W opracowaniu została opisana procedura symulacji zjawisk transportu energii w zaprojektowanych modelach tkaniny i dzianiny, zachodzących w warunkach porównywalnych z warunkami panującymi w komorze klimatyzacyjnej urządzenia pomiarowego Sweating Hotplate 8.2 podczas wyznaczania oporu cieplnego tekstyliów. Po uruchomieniu modułu *SolidWorks Flow Simulation* należy skorzystać z wbudowanego przewodnika symulacji – *Wizarda* [54].

Model tkaniny/dzianiny można zredukować do minimalnych wymiarów (np. za pomocą operacji *Wyciągnięcia wycięcia*, w celu zredukowania czasu obliczeń, jednocześnie pozwalających zachować właściwości modelowanych tekstyliów. Model należy umieścić na płycie (o stałej temperaturze 35°C) o tym samym polu powierzchni co tekstylia. Cały układ należy umieścić w domenie obliczeniowej w kształcie prostopadłościanu (rysunki 21 i 22) o odpowiednio dużej przestrzeni nad modelem.



Rys. 21. Model tkaniny w domenie obliczeniowej  
Źródło: opracowanie własne.



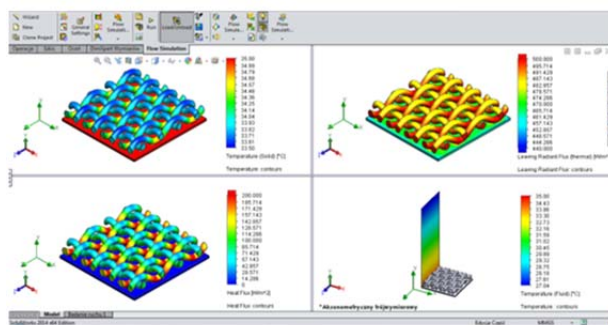
Rys. 22. Model dzianiny w domenie obliczeniowej  
Źródło: opracowanie własne.

Warunki początkowe w domenie obliczeniowej należy zdefiniować następująco: temperatura powietrza –  $20^{\circ}\text{C}$ , ciśnienie powietrza –  $1013,25\text{ hPa}$ , wilgotność względna powietrza –  $65\%$ . Symulacje należy przeprowadzić dla stanu ustalonego (bez zależności od czasu). Następnie należy przypisać modelowi odpowiedni materiał. Moduł *SolidWorks Flow Simulation* jest wyposażony w bogatą bibliotekę surowców, uwzględniającą tworzywa sztuczne, metale, stopy metali, niemetale. Wbudowaną bazę materiałów można uzupełniać o nowe, uwzględniając ich parametry fizyczne. Przed rozpoczęciem symulacji definiuje się główne zadania obliczeniowe dla programu, tzw. *Goale*. W rozpatrywanym przypadku zadano przeprowadzenie obliczeń wartości maksymalnych i minimalnych następujących parametrów:

- temperatury tkaniny/dzianiny,
- temperatury powietrza,
- strumienia energii w wyniku przewodnictwa cieplnego przez powierzchnię tkaniny/dzianiny,

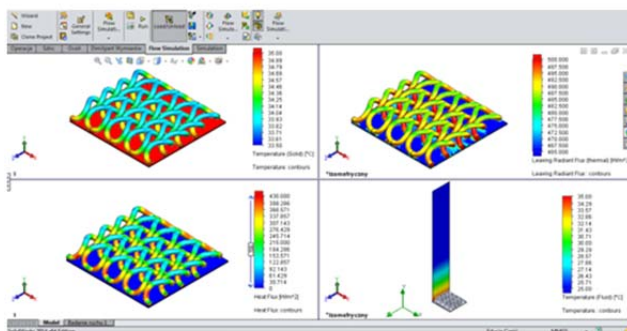
- strumienia energii w wyniku promieniowania termicznego przez powierzchnię tkaniny/dzianiny.

Po zakończeniu obliczeń program zapisuje dane, które można wyeksportować do pliku tekstowego lub arkusza kalkulacyjnego. Jedną z wielu zalet oprogramowania jest możliwość otrzymania kolorowych wizualizacji otrzymanych rezultatów. Są to wykresy powierzchniowe w kolorowej skali, które można otrzymać na dowolnej analizowanej powierzchni modelu. Rysunki 23-24 przedstawiają wizualizację wyników otrzymanych dla modelu tkaniny/dzianiny wykonanej z włókien poliamidowych. Na kolejnych wykresach powierzchniowych zilustrowano rozkłady: temperatury, strumienia przewodzenia ciepła, strumienia promieniowania termicznego w modelu oraz rozkład temperatury powietrza w domenie obliczeniowej.



Rys. 23. Wizualizacje wyników otrzymanych dla modelu tkaniny

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 24. Wizualizacje wyników otrzymanych dla modelu dzianiny

Źródło: opracowanie własne.

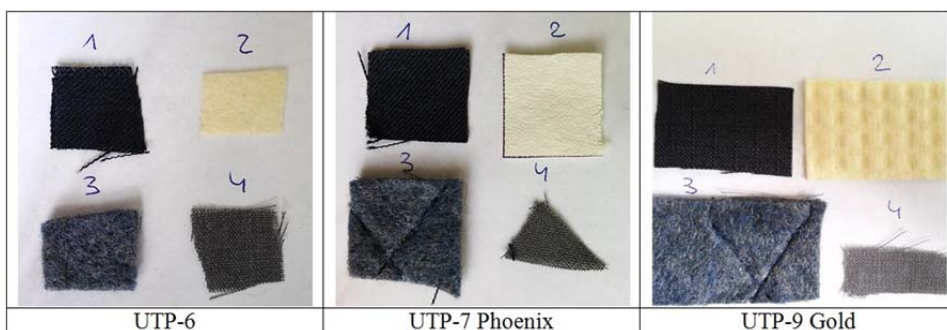
Oprogramowanie umożliwia przeprowadzanie symulacji dla materiałów zbudowanych z wielu warstw (np. kompozytów), które można zaprojektować oddzielnie, a następnie korzystając z funkcji *Złożenie* ułożyć w dowolnej kolejności. W następnym podrozdziale opracowania została przedstawiona teoretyczna analiza termoizolacyjności materiałów na przykładzie trzech materiałowych układów wielowarstwowych wykonanych dla strażackiej odzieży ochronnej.

## 1.10. Analiza zjawiska transportu energii cieplnej w odzieży ochronnej dla strażaków

Z opisu metodyki przedstawionej w rozdziale 1.9 wynika, iż oprogramowanie *SolidWorks* umożliwia symulację przepływu strumienia ciepła przez tekstylia o zróżnicowanej budowie. W podrozdziale tym przedstawione zostały wyniki symulacji zjawisk transportu energii cieplnej dla układów trójwarstwowych UTP-6, UTP-7 Phoenix, UTP-9 Gold, przeznaczonych na odzież dla strażaków. Modele układów warstwowych zostały wykonane w programie *SolidWorks* na podstawie parametrów geometrycznych wyznaczonych w oparciu o obrazy spod optycznego mikroskopu stereoskopowego. Dokładna charakterystyka tych materiałów została przedstawiona w rozdziale 1.8. W tabeli 17 zamieszczono wartości grubości poszczególnych warstw oraz grubości nitki w tkaninach wchodzących w skład warstwy zewnętrznej i podszewki, natomiast rysunek 25 zawiera fotografie rozseparowanych warstw wchodzących w skład układów trójwarstwowych.

Tabela 17. Geometryczne parametry struktury poszczególnych warstw w układach trójwarstwowych UTP-6, UTP-7 Phoenix, UTP-9 Gold

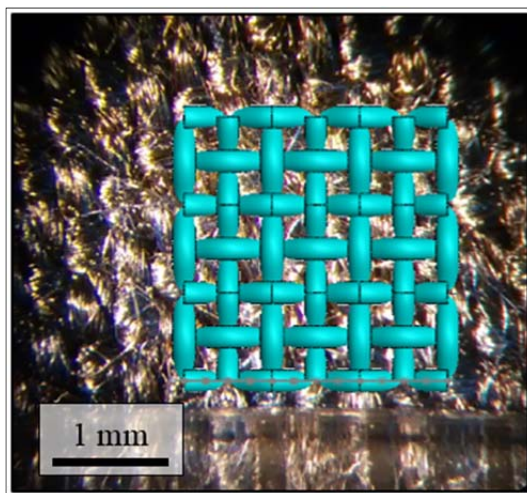
Układ	Warstwa	Grubość warstwy, mm	Grubość nitki, mm
UTP-6	tkanina zewnętrzna	0,42	0,33
	membrana	0,72	-
	podszewka	2,34	0,20
UTP-7 Phoenix	tkanina zewnętrzna	0,42	0,33
	membrana	0,54	-
	podszewka	2,34	0,20
UTP-9 Gold	tkanina zewnętrzna	0,44	0,32
	membrana	1,74	-
	podszewka	2,25	0,20



Rys. 25. Zdjęcia rozseparowanych warstw wchodzących w skład układów trójwarstwowych: 1 – tkanina zewnętrzna, 2 – membrana, 3 – włóknina podszewki, 4 – tkanina podszewki

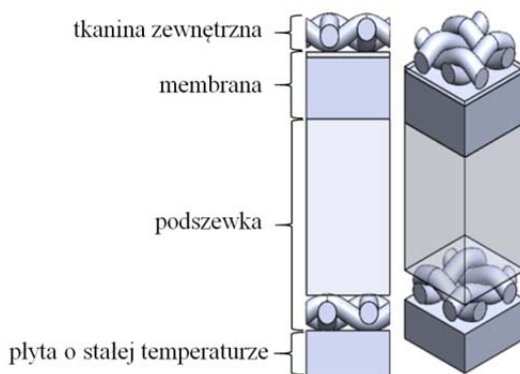
Źródło: opracowanie własne.

Rysunek 26 ilustruje model tkaniny zewnętrznej w układzie trójwarstwowym UTP-6 uzyskany na podstawie obrazu spod optycznego mikroskopu stereoskopowego.



Rys. 26. Model tkaniny zewnętrznej w układzie trójwarstwowym UTP-6 uzyskany na podstawie obrazu spod optycznego mikroskopu stereoskopowego  
Źródło: opracowanie własne.

Geometryczny model żyłkowy każdej tkaniny uwzględniał grubość tkaniny (zmierzonej eksperymentalnie) oraz wymiar średnicy przekroju poprzecznego nitki wyznaczony na podstawie obrazów spod mikroskopu optycznego. W celu zaoszczędzenia czasu obliczeń model został zredukowany do najmniejszego periodycznego elementu tkaniny – raportu (rys. 27). W symulacjach górną warstwę zawsze stanowiła tkanina zewnętrzna, natomiast dolną (od strony skóry) – podszewka.



Rys. 27. Model układu trójwarstwowego UTP-6 umieszczony na płycie o stałej temperaturze 35°C  
Źródło: opracowanie własne.

Symulacje transportu energii przeprowadzono zgodnie z metodyką opisaną w rozdziale 1.9.3. Dla każdego układu trójwarstwowego model uwzględnił następujące parametry:

- grubość tkanin,
- grubość włókniń,
- grubość folii,
- porowatość włókniń,
- parametry fizyczne surowca, z którego zostały wykonane tkaniny, włókniń i folie, takie jak:
  - gęstość,
  - współczynnik przewodnictwa cieplnego,
  - ciepło właściwe,
  - zdolność emisyjna.

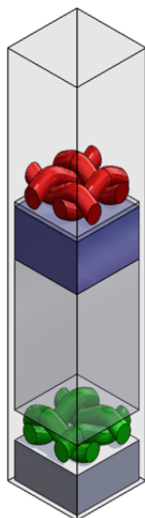
W tabeli 18 zostały przedstawione parametry fizyczne surowców poszczególnych warstw w układach trójwarstwowym UTP-6, UTP-7 Phoenix, UTP-9 Gold.

Tabela 18. Parametry fizyczne surowców poszczególnych warstw w układach trójwarstwowym UTP-6, UTP-7 Phoenix, UTP-9 Gold

Parametr	Nomex	Kevlar	PTFE	PU
Gęstość, $kg \cdot m^{-3}$	1380	1440	2200	1200
Ciepło właściwe, $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	1396	1200	1300	1120
Współczynnik przewodnictwa cieplnego, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	0,09	0,04	0,25	0,035
Emisyjność	0,65	0,50	0,85	0,90
Porowatość włókniń w membranie, %	70			
Porowatość włókniń w podszewce, %	90			

We wszystkich symulacjach zostały uwzględnione następujące zjawiska fizyczne: przewodnictwo cieplne, promieniowanie termiczne, konwekcja i grawitacja.

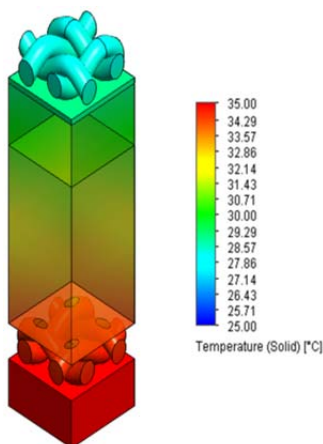
Modele układów trójwarstwowym zostały umieszczone na płycie (wykonanej z miedzi) o stałej temperaturze 35°C. Całość została zamknięta w domenie obliczeniowej w kształcie prostopadłościanu o wymiarach  $(1,3 \times 1 \times 5) \cdot 10^{-3} m$ . Na rysunku 28 został przedstawiony model układu trójwarstwowym UTP-6 w domenie obliczeniowej.



Rys. 28. Model układu trójwarstwowego UTP-6 umieszczonego na płycie o stałej temperaturze  $35^{\circ}\text{C}$ , zamknięty w domenie obliczeniowej w kształcie prostopadłościanu o wymiarach  $(1,3 \times 1 \times 5) \cdot 10^{-3} \text{m}$

Źródło: opracowanie własne.

Warunki początkowe przyjęte podczas symulacji w domenie obliczeniowej odpowiadały warunkom, przy których dokonuje się pomiaru oporu cieplnego przy użyciu urządzenia Sweating Hotplate 8.2 (temperatura powietrza –  $20^{\circ}\text{C}$ , ciśnienie powietrza –  $1013,25 \text{ hPa}$ , wilgotność względna powietrza –  $65\%$ ). Wszystkie symulacje zostały przeprowadzone dla stanu ustalonego. Przykładowy wynik symulacji dla układu UTP-6 przedstawiono na rysunku 29.

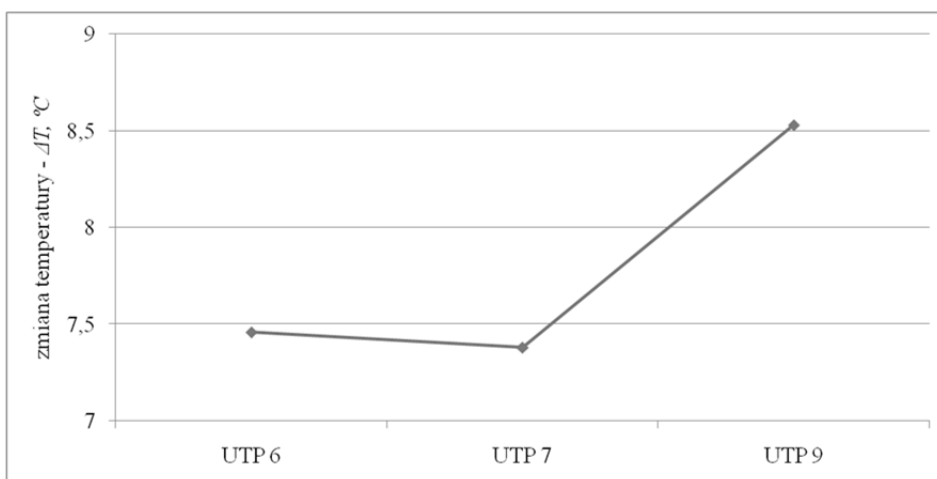


Rys. 29. Rozkład temperatury dla układu trójwarstwowego UTP-6 umieszczonego na płycie o stałej temperaturze  $35^{\circ}\text{C}$

Źródło: opracowanie własne.



W opracowaniu zostały przedstawione wyniki symulacji przeprowadzonych na trójwymiarowych modelach układów trójwarstwowych w celu oszacowania i porównania ich termoizolacyjności na podstawie wyznaczenia różnicy temperatur między dolną a górną warstwą układu. Dolna warstwa (podszewka), będąca w bezpośrednim kontakcie z płytą była z nią w równowadze termicznej i jej temperatura maksymalna wynosiła  $T_{\max}^d = 35^{\circ}\text{C}$ . W symulacjach została obliczona średnia temperatura tkaniny zewnętrznej jako górnej warstwy układu  $T_{\text{sr}}^g$ . Na podstawie znajomości tych temperatur dla każdego układu została obliczona zmiana temperatury,  $\Delta T = T_{\max}^d - T_{\text{sr}}^g$ , w układzie trójwarstwowym w kierunku prostopadłym do podgrzewanej płyty. Wyniki zostały przedstawione na rysunku 30.

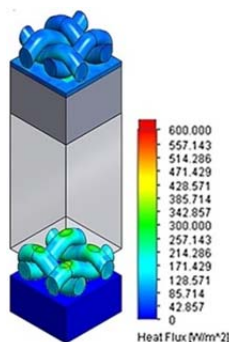


Rys. 30. Zmiana temperatury  $\Delta T$  w kierunku prostopadłym do podgrzewanej płyty w układach trójwarstwowych UTP-6, UTP-7 Phoenix, UTP-9 Gold  
Źródło: opracowanie własne.

### 1.10.1. Wnioski wynikające z symulacji zjawisk transportu strumienia ciepła przez materiały stosowane w odzieży strażackiej przy użyciu programu *SolidWorks*

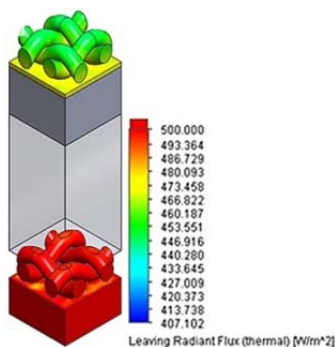
Wyniki symulacji wykazały, że największą termoizolacyjnością charakteryzował się układ UTP 9 Gold, dla którego zmiana temperatury  $\Delta T$  przyjęła wartość:  $8,52^{\circ}\text{C}$ . W przypadku dwóch pozostałych układów: UTP-6 i UTP-7 Phoenix zmiana temperatury  $\Delta T$  wyniosła odpowiednio:  $7,46^{\circ}\text{C}$  i  $7,36^{\circ}\text{C}$ . Ponieważ wszystkie układy trójwarstwowe posiadały podobny skład surowcowy, jednakową kolejność ułożenia warstw, największy wpływ w uzyskanych różnych wartościach  $\Delta T$  miały różnice w grubości układów trójwarstwowych. Układ UTP 9 Gold charakteryzował się wyraźnie większą grubością ( $4,44\text{ mm}$ ) na tle dwóch pozostałych układów UTP-6 i UTP-7 Phoenix, których grubości wynosiły odpowiednio:  $3,48\text{ mm}$  i  $3,30\text{ mm}$ .

Na podstawie symulacji zostały wyznaczone również wizualizacje rozkładów transferu ciepła poprzez przewodnictwo i promieniowanie, przez wybrane powierzchnie układów trójwarstwowych. Na rysunku 31 został przedstawiony rozkład strumienia przewodnictwa ciepłego, natomiast na rysunku 32 promieniowania ciepłego dla układu trójwarstwowego UTP-6.



Rys. 31. Rozkład strumienia przewodnictwa ciepłego dla układu trójwarstwowego UTP-6

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 32. Rozkład strumienia promieniowania ciepłego dla układu trójwarstwowego UTP-6

Źródło: opracowanie własne.

W przypadku strumienia przewodnictwa ciepłego jego dominująca składowa ma kierunek prostopadły do ogrzewanej płyty, a zwrot ku górze. Zgodnie z przewidywaniami, obszarami o największych wartościach strumienia są fragmenty tkaniny podszewki, mające bezpośredni kontakt z podgrzewaną płytą. W obszarach tych występuje największy gradient temperatur.

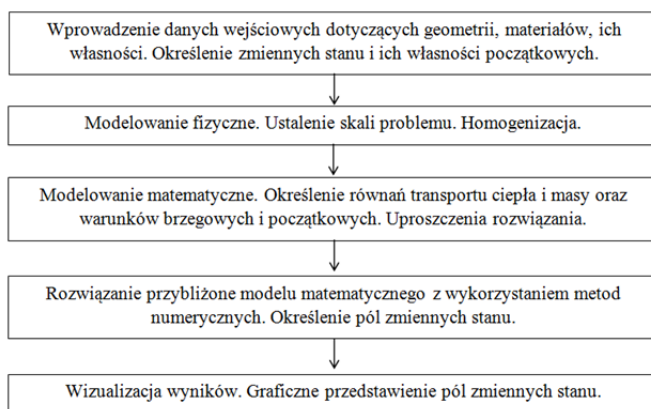
Rozkład strumienia promieniowania potwierdza silną zależność emisji od temperatury ( $\sim T^4$ ). Największe straty ciepła wskutek promieniowania ciepłego zostały zaobserwowane na powierzchniach warstwy podszewki (o największej temperaturze). Wartość emisji wyraźnie spada wraz z temperaturą i dla tkaniny

zewnątrznej jest niższa o około 10%. Przy użyciu modułu *SolidWorks Flow Simulation* nie ma możliwości przeprowadzenia symulacji sprzężonego transportu strumienia ciepła i masy, dlatego też dla celów poznawczych został opracowany unikatowy program komputerowy, którego założenia przedstawiono w następnym rozdziale.

## 1.11. Analiza sprzężonego transportu masy i ciepła w kompozytowym ubiorze włókienniczym

### 1.11.1. Założenia bilansu, model fizyczny sprzężonego przewodzenia ciepła i masy

Etap tworzenia modelu składa się z dwóch części: modelowania fizycznego i modelowania matematycznego. Model fizyczny sprzężonego przewodzenia ciepła i masy zawiera zespół zależności jakościowo opisujących prawa fizyczne rządzące zjawiskiem, własności materiału, ogólną charakterystykę zjawisk transportu ciepła i masy itp. Model matematyczny to zespół związków matematycznych, ilościowo opisujących zjawiska sprzężonego przewodzenia ciepła i masy w postaci równań przewodzenia ciepła, dyfuzji masy, uzupełnionego o zespół warunków brzegowych i początkowych. Rozwiązanie tego problemu jest przybliżone i możliwe przy wykorzystaniu metod numerycznych. Uzyskane wyniki mogą być poddane wizualizacji za pomocą dowolnego programu z modułem graficznym. Schemat rozwiązywania problemu został pokazany na rysunku 33.



Rys. 33. Schemat rozwiązywania problemu sprzężonego transportu ciepła i masy

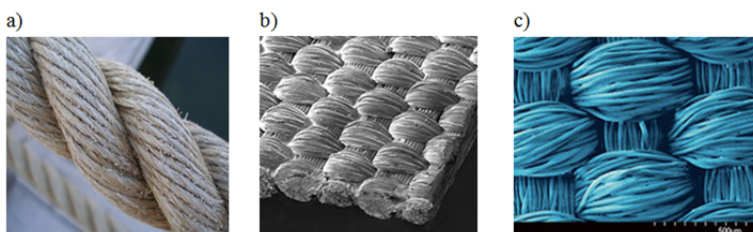
Źródło: opracowanie własne.

### 1.11.2. Ogólne założenia modelu wymiany masy i ciepła

Model sprzężonego transportu ciepła i masy jest rozpatrywany w kompozytowej konstrukcji ubioru włókienniczego. Transport ten jest opisywany za

pomocą równań różniczkowych drugiego rzędu z uwagi na zmienne stanu i pierwszego rzędu z uwagi na czas. Równania te są zdefiniowane z wykorzystaniem akumulacji ciepła i masy w ubiorze, ich transportu przez materiał oraz konwekcji na brzegu zewnętrznym, zaś warunki brzegowe i początkowe modelują wpływ ciała człowieka oraz otoczenia.

Sformułowanie bilansowe przewodzenia wymaga istnienia konstrukcji jednorodnej, czyli homogenicznej. Homogenizacja to wykazanie zastępczych współczynników określających własności przewodzenia ciepła i dyfuzji masy. Kompozytowa konstrukcja włókiennicza może być całkowicie niejednorodna, jednorodna okresowo w sposób powtarzalny lub jednorodna okresowo w sposób niepowtarzalny. Po homogenizacji otrzymuje się włókienniczy materiał jednorodny, o uśrednionych parametrach przewodzenia ciepła (współczynnik przewodności cieplnej) i masy (współczynnik dyfuzji masy). Problem homogenizacji został omówiony w szeregu prac, patrz np. Kobza [55], Kopias (red.) [56], Korycki [57, 58]. Niejednorodność konstrukcji włókienniczych może wystąpić w dwóch skalach (rys. 34).



Rys. 34. Porowatość konstrukcji włókienniczej: a) lina, b) żagiel z tworzywa sztucznego, c) tkanina

Źródło:

- a) [http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1516-14392007000200012&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1516-14392007000200012&script=sci_arttext);
- b) <http://www.northsails.pl/%C5%BBAGLE/Do%C5%BCegluginawiatr/PanelowePremium200/tabid/27504/language/en-US/Default.aspx>
- c) <http://tkaniny.com.pl/Wiadomo%C5%9Bci/Przyroda-jako-wz%C3%B3r-Efekt-samoczyszczenia-w-tekstyliach-14378.html>

Skala mikro dotyczy pojedynczych włókien, które tworzą przędzę w złożonym procesie technologicznym. W stanie suchym są wypełnione powietrzem, natomiast podczas transportu potu od skóry i/lub wilgoci z otoczenia wypełniają się cieczą. Istnieją również inne substancje wypełniające: kleje w dzianinach futerkowych lub laminatach włókienniczych, żele w konstrukcjach specjalnych, apretury naniesione podczas obróbki wykańczającej itp. W większości źródeł porowatość wewnętrzna włókien jest określana jako parametr materiałowy, w sposób doświadczalny lub pół-doświadczalny. Należy jednak zwracać uwagę na zmianę substancji w wolnych przestrzeniach wewnątrz włókna z powietrza na ciecz, co może powodować błędy w wyznaczanych współczynnikach przewodzenia ciepła i dyfuzji wilgoci. Dlatego ich homogenizacja musi uwzględniać

zarówno porowatość wewnętrzną, jak i substancję wypełniającą wolne przestrzenie (powietrze lub ciecz).

Skala makro dotyczy całego kompozytu włókienniczego, złożonego z włókien i wolnych przestrzeni między włóknami. Ubiór jako wyrób włókienniczy to produkt niejednorodny, o skomplikowanym kształcie i skomplikowanych oddziaływaniach wewnętrznych. Brak jest możliwości konstrukcji modelu w skali makro, opisującego reprezentatywnie oddziaływania wewnętrzne w sposób ilościowy, z jednoczesną możliwością ich sumowania dla całego wyrobu. Nawet opis jakościowy takich mechanizmów w skali makro jest trudny i kłopotliwy. Konstrukcje włókiennicze mają różną budowę, czyli istnieją różne metody i skale homogenizacji. W zależności od rodzaju wyrobu włókienniczego można je scharakteryzować następująco.

Najbardziej skomplikowana jest homogenizacja włókien, które mają najczęściej budowę stochastyczną. Wówczas homogenizuje się cały materiał bez jakichkolwiek powtórzeń. Włókniny charakteryzują się własnościami przewodzenia ciepła zależnymi od sposobu ułożenia pojedynczych włókien, wynikającego z procesu technologicznego. Dowolny rozkład włókien we włókninie zapewnia izotropowość przewodzenia masy i ciepła w objętości, czyli ich niezależność od kierunku. Działania są prostsze do przeprowadzenia ich homogenizacji, mogą mieć powtarzalną budowę, choć działania dystansowe są skomplikowane geometrycznie i trudne do budowy modelu. Homogenizacja zależy więc od rodzaju i jest przeprowadzana inaczej dla każdej dzianiny. Większość dzianin ma najczęściej ortotropowe własności przewodzenia ciepła i masy, czyli przewodzenie jest zależne od kierunku. Najmniej problemów stwarzają tkaniny, ponieważ mają najbardziej powtarzalną budowę i najprostsze do opisu oddziaływania wewnętrzne. Można wyodrębnić pewne, powtarzalne, obszary o identycznej geometrii, co znacznie upraszcza homogenizację i sprowadza ją do klasycznych i powtarzalnych metod, z możliwością implementacji metod numerycznych. Zdecydowana większość tkanin ma także ortotropowe własności przewodzenia ciepła i masy. Niektóre wyroby włókiennicze mimo geometrii powtarzalnej w skalach mikro i makro mogą mieć słabo określone lub przeanalizowane oddziaływania wewnętrzne, patrz np. preformy kompozytów, tekstylia przestrzenne, konstrukcje dystansowe, odwadniające itp. Ich homogenizacja, czyli także własności przewodzenia ciepła i masy zależą każdorazowo od konkretnego przypadku. Stworzenie modelu wymaga pewnych założeń upraszczających odnoszących się do niżej opisanych zjawisk, patrz Li [59].

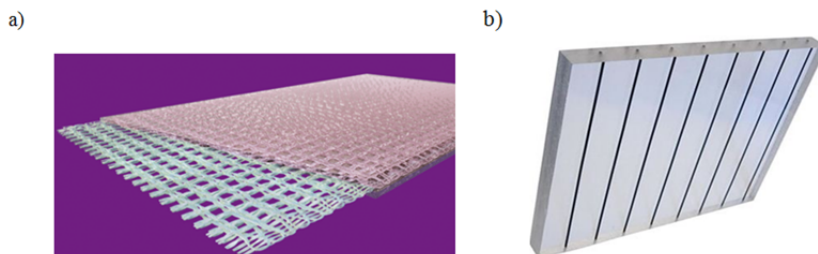
Pierwsze z nich to brak zmian postaciowych materiału. Zakłada się, iż materiał może zmieniać w nieznacznym stopniu swoją objętość pod wpływem ciepła (szczególnie włókna sztuczne) i/lub wilgoci. Wówczas zmienia się stosunek objętości materiału włókienniczego i wolnych przestrzeni między materiałem, czyli warunki przewodzenia ciepła i masy. Z uwagi na stosunkowo niedużą skalę, zmiany te można pominąć. Drugie zjawisko to transport ciepła wewnątrz materiału. Zakłada się, iż ciepło jest przekazywane przez przewodzenie we włóknach oraz konwekcję i promieniowanie (radiację) na ich zewnętrznych

powierzchniach do wolnych przestrzeni między włóknami wypełnionych powietrzem. Trzecie założenie odnosi się do transportu masy (wilgoci) wewnątrz materiału. Transport masy wewnątrz włókien można pominąć, bo współczynnik dyfuzji wilgoci w materiale włókienniczym jest znacznie mniejszy niż w powietrzu między włóknami. Masa (para wodna) jest transportowana w wolnych przestrzeniach między włóknami przez dyfuzję. Kolejne założenia dotyczą wpływu uporządkowania włókien na transport masy i ciepła. Orientacja i uporządkowanie włókien wewnątrz materiału nie mają praktycznego wpływu na sprzężony transport ciepła i masy. Porowatość większości materiałów włókienniczych jest znaczna, średnice włókien niewielkie, dlatego para wodna może przemieszczać się znacznie szybciej w wolnych przestrzeniach między włóknami niż w samych włóknach niezależnie od ich orientacji. Kolejnym zjawiskiem jest równowaga termodynamiczna w skali mikro. Mimo przepływu ciepła i masy w skali makro, czyli w układzie człowiek – wyrób włókienniczy – otoczenie, można założyć chwilową równowagę termodynamiczną w skali mikro, czyli między włóknami i powietrzem w przestrzeniach między nimi. Oznacza to, że podstawowe parametry makroskopowe układu są ustalone (ciśnienie, objętość, funkcje stanu), co występuje przy braku transportu. Jest to uzasadnione małymi średnicami większości włókien oraz ich dużą objętością w stosunku do wagi, czyli dużym współczynnikiem powierzchni do objętości. Zgadza się to z ogólną zasadą dążenia wszystkich procesów do osiągnięcia stanów równowagi, co przy równowadze trwałej zapewnia maksimum entropii i minimum potencjału termodynamicznego.

Wyroby odzieżowe są obiektami trójwymiarowymi. Przy zachowaniu takiego samego kształtu oraz warunków przewodzenia ciepła i masy można zredukować przestrzenny (trójwymiarowy) problem transportu do dowolnego przekroju ubioru, czyli problemu płaskiego (dwuwymiarowego). Z uwagi na możliwości obliczeń i ograniczenia metody, transport ciepła i masy będzie można analizować w układzie dwuwymiarowym, czyli płaskim, co może znacznie uprościć skalę i czas obliczeń. Zmienne stanu opisujące aktualny stan fizyczny układu to: stężenie pary wodnej we włóknach  $w_f$ , stężenie pary wodnej w przestrzeniach między włóknami  $w_a$ , temperatura  $T$ .

### 1.11.3. Określenie skali rozwiązania zagadnienia

Skala rozwiązania zagadnienia oznacza w tym przypadku określenie liczby wymiarów, jakie należy uwzględnić w rozwiązaniu problemu. Ogólny przypadek rozwiązania problemu transportu ciepła i masy jest przestrzenny, czyli określany w przestrzeni trójwymiarowej 3D. Wynika to ze zmienności zarówno geometrii zewnętrznej i wewnętrznej materiału włókienniczego, jak i zmienności warunków przewodzenia masy i ciepła na jego powierzchni (czyli warunków brzegowych). Stąd najbardziej ogólny przypadek to trójwymiarowa homogenizacja i zagadnienie sprzężonego przewodzenia ciepła i masy w przestrzeni trójwymiarowej 3D.



Rys. 35. Redukcja przestrzennej konstrukcji trójwymiarowej do płaskiej konstrukcji dwuwymiarowej

Źródło: a) [http://www.jenerix.com.pl/quartz\\_splint2.php](http://www.jenerix.com.pl/quartz_splint2.php)

b) <http://czestochowa.all.biz/szklo-akrylowe-wzmacniane-wloknem-poliamidowym-o-67658>

W szczególnym przypadku, kiedy zarówno geometria zewnętrzna i wewnętrzna, jak i warunki brzegowe przewodzenia masy i ciepła są takie same w jednym z kierunków, to występuje powtarzalność warunków geometrycznych i fizycznych w tym kierunku. Wówczas problemy homogenizacji i rozwiązanie transportu masy i ciepła można sprowadzić do dowolnego przekroju konstrukcji, czyli problemu dwuwymiarowego 2D (płaskiego) – rysunek 35. Zaletą redukcji problemu z trój- do dwuwymiarowego, czyli zmniejszenia wymiarowości, to znaczne skrócenie czasu obliczeń dzięki możliwości implementacji mniejszej liczby węzłów siatki elementów skończonych oraz mniejsza kłopotliwość konstrukcji takiej siatki. Wada to każdorazowa konieczność dokładnej analizy problemu, zarówno geometrii, jak i warunków transportu. Część problemów może też być obciążona pewnym błędem przybliżenia, z racji niepełnej zgodności warunków rzeczywistych z modelowymi.

#### 1.11.4. Metody homogenizacji konstrukcji włókienniczych w wymianie masy i ciepła

Zasada modelowania zakłada istnienie konstrukcji jednorodnej (homogenicznej), o dokładnie zdefiniowanych współczynnikach przewodzenia ciepła i dyfuzji masy. Cel stosowania metod obliczeniowych homogenizacji to określenie wartości zastępczych tych współczynników, z wykorzystaniem różnych metod matematycznych. Niezależnie od zastosowanej metody matematycznej są dwie drogi postępowania. Pierwsza z nich wykorzystuje opis teoretyczny do opisu współczynników transportu ciepła i masy. Istnieją dwie podgrupy takich metod. Jedna podgrupa metod teoretycznych może być uniwersalna, czyli odnosząca się do każdego przypadku analizy. Inne metody teoretyczne są szczegółowe, odnoszą się do konkretnego układu: materiału, geometrii wolnych przestrzeni między włóknami, substancji wypełniającej te przestrzenie, kształtu brzegów zewnętrznych całego wyrobu itp. Druga metoda polega na określeniu zastępczych współczynników transportu masy i ciepła drogą doświadczalną lub mieszaną z wykorzystaniem doświadczalnej. Z racji założenia ma ona zastosowanie

tylko do bardzo ograniczonej grupy zagadnień: geometrii brzegów, geometrii wolnych przestrzeni między włóknami, warunków transportu ciepła i masy itp. Wynika to z przyjętych założeń w chwili rozpoczęcia homogenizacji. Ponieważ współczynniki przewodzenia ciepła i dyfuzji masy określa się w taki sam sposób, metody te zostaną omówione dla transportu ciepła. Dla uproszczenia opisu metod założymy izotropię przewodzenia, czyli niezależność własności przewodzenia od kierunku.

Pierwsza metoda, jaka zostanie omówiona, to metoda teorii mieszaniny. Obecnie jest szeroko stosowaną metodą homogenizacji, spotykaną w wielu publikacjach. Jako jedni z pierwszych opisali ją Golański, Terada i Kikuchi [60]. Jest to metoda wykorzystująca teorię, która opisuje własności mieszaniny w funkcji udziałów objętościowych jej składników. Metoda ta jest uniwersalna, z możliwością aplikacji do wszystkich konstrukcji włókienniczych, jak też innych materiałów. Zastępczy współczynnik przewodności cieplnej  $\lambda_z$  ma postać:

$$\lambda_z = \sum_{i=1}^N \lambda_i \zeta_i; \quad \zeta_k = \frac{V_k}{\sum_{i=1}^N V_i}, \quad k = 1, \dots, N \quad (94)$$

gdzie:  $\lambda_i$  to współczynnik przewodności cieplnej materiału  $i$  w mieszaninie,  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ,  $\zeta_i$  – bezwymiarowy współczynnik objętościowy wypełnienia materiału  $i$  w mieszaninie,  $V_k$  – objętość materiału  $k$  w mieszaninie,  $m^3$ ,  $N$  – liczba materiałów uwzględnionych podczas homogenizacji.

Kolejna metoda homogenizacji to metoda analogii hydrostatycznej. Stosowana rzadziej niż poprzednia, również podana w pracy [60], Golański, Terada i Kikuchin. Metoda ta ma podstawy teoretyczne, które wywodzą się z hydrostatycznego udziału składników w tworzeniu substancji. Również jest uniwersalna z możliwością szerokiego zastosowania nie tylko we włókiennictwie. Zastępczy współczynnik przewodności cieplnej  $\lambda_z$  ma postać:

$$\lambda_z = \left( \sum_{i=1}^N \lambda_i \zeta_i \right) \left( \sum_{k=1}^N \zeta_k \right)^{-1}. \quad (95)$$

Metoda kolejna została omówiona w pracy [61] jako metoda doświadczalno-analityczna, opracowana dla kompozytów dwuskładnikowych. Materiał wzmocnienia to wzajemnie równoległe włókna o stałym promieniu  $r$ , rozłożone regularnie na grubości kompozytu. Materiał osnowy nie jest dokładnie określony, w zasadzie może być dowolny. Zakładając stały rozkład materiałów wzmocnienia i osnowy na grubości kompozytu, problem homogenizacji sprowadza się do dowolnego przekroju takiej konstrukcji w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku włókien i udział objętościowy włókien jest opisany za pomocą promienia  $r$ . Zastępczy współczynnik przewodności cieplnej ma postać:



$$\lambda_z = \lambda_{\text{wyp}} \left( 1 - r^{\frac{2}{3}} \right) + \frac{\lambda_{\text{mat}} \lambda_{\text{wyp}}}{2\lambda_{\text{mat}} \left( 1 - r^{\frac{1}{3}} \right) + \lambda_{\text{wyp}} r^{\frac{1}{3}}} r^{\frac{2}{3}}. \quad (96)$$

W powyższym związku  $\lambda_{\text{mat}}$  oraz  $\lambda_{\text{wyp}}$  to odpowiednio współczynniki przewodności cieplnej w materiale włókna oraz osnowy, czyli wypełnienia,  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ . Wadą metody jest konieczność przeprowadzenia dodatkowej homogenizacji w przypadku niejednorodności włókien i obecności w nich powietrza, substancji chemicznych lub innych składników.

Metodę opracowaną dla kompozytów trójskładnikowych wprowadził Kamiński [62] jako metodę doświadczalno-analityczną, odnoszącą się do kompozytów złożonych z trzech składników. W rozważaniach modelowych przyjęto, że wzmocnienia to równoległe do siebie, okrągłe włókna o stałym promieniu  $r_c$ , osadzone bezpośrednio w osnowie oraz włókna o stałym promieniu  $r_e$ , położone w dodatkowej, specjalnej warstwie wzmocnienia, tzw. interfazie, która oddziela warstwę włókien (warstwę wzmocnienia) od osnowy. Materiał osnowy nie jest dokładnie określony. Dodatkowo zakłada się, że kształt kompozytu jest taki sam wzdłuż kierunku włókien. Problem homogenizacji sprowadza się zatem do dowolnego przekroju kompozytu dokonanego płaszczyzną prostopadłą do kierunku włókien. Zastępczy współczynnik przewodności cieplnej ma więc postać:

$$\lambda_z = \lambda_3 - \frac{3(1-f_3)\lambda_3}{3f_3}; \quad f_1 = \xi_1(1-f_3); \quad f_2 = \xi_2(1-f_3); \quad \xi_3 = \left( \frac{r_c}{r_e} \right)^3 = 1 - \xi_2. \quad (97)$$

$$f_3 - \frac{3f_1\lambda_2}{\lambda_3 - \lambda_2 - \frac{3f_1\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}}$$

W tych zależnościach  $r_c$  oznacza promień włókien wzmocnienia bezpośrednio w osnowie,  $m$ ;  $r_e$  to promień włókien wzmocnienia w dodatkowym materiale (interfazie),  $m$ ;  $\lambda_1$   $\lambda_2$   $\lambda_3$  to odpowiednio współczynniki przewodności cieplnej materiału włókien w warstwie wzmocnienia, materiału włókien w warstwie pośredniej (interfazie) i materiału osnowy,  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ;  $\xi_1$   $\xi_2$   $\xi_3$  określają odpowiednio bezwymiarowe współczynniki objętościowe materiału włókien w warstwie wzmocnienia, materiału włókien w warstwie pośredniej (interfazie) i materiału osnowy.

### 1.11.5. Model matematyczny sprzężonej wymiany masy i ciepła

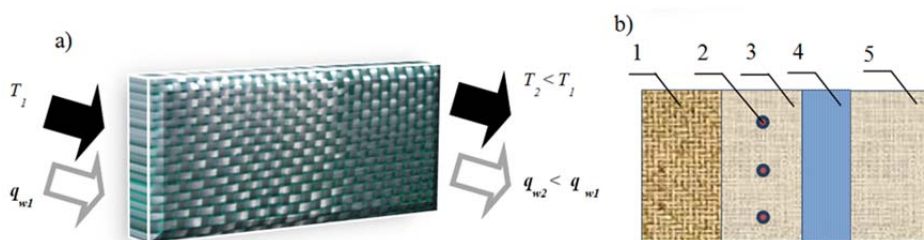
Model matematyczny sprzężonej wymiany ciepła i masy to zespół równań opisujących zjawiska transportu, zapisany w postaci szeregu zależności. Pierwsza grupa to *zależności bilansowe*, które zakładają równowagę między ciepłem i masą: doprowadzanymi do materiału ubioru oraz pochłanianymi i odprowadzanymi na zewnątrz materiału. Druga grupa to *zależności konstytutywne*, czyli związki charakteryzujące transport masy i ciepła wewnątrz materiału. Nie wyni-

kają one z ogólnych zasad zachowania i termodynamiki i są to zależności między strumieniami ciepła i masy a siłami napędowymi, które wywołują sprzężony transport. *Związki stanu* opisują zależności między zmiennymi stanu ubioru włókienniczego. Ostatnia grupa to *opisy współczynników fizykochemicznych*, które dotyczą właściwości danej fazy lub rodzaju materiału. Jeśli układ jest wielofazowy, to w przypadku ogólnym dla każdej z faz należy określić wszystkie cztery zależności oraz dodatkowo związki charakteryzujące równowagę fazową, patrz np. Zarzycki [63]. Występuje to np. w układzie materiał ubioru – gaz w jego otoczeniu – pot na skórze itp. W pewnych przypadkach można ów opis uprościć, gdy stan równowagi fazowej zachodzi w bardzo krótkim czasie, czyli stan nierównowagi fazowej jest bardzo krótki. Wówczas cztery powyższe zależności należy określić dla tylko jednej fazy, czyli ciała stałego (włókienniczego materiału ubioru), patrz Zarzycki [63].

### 1.11.5.1. Określenie zależności dla modelu matematycznego

Analiza dotyczy trójwymiarowego fragmentu ubioru wykonanego z materiału jednorodnego, który jest poddany działaniu pola temperatury  $T$  oraz gęstości strumienia masy  $q_w$  (rysunek 36a). Konstrukcja kompozytu włókienniczego może być złożona, może uwzględniać źródła ciepła w postaci np. elementów grzejących, tekstronicznych itp., jak i źródła masy w postaci mikrokapsułów. Dla tak zdefiniowanego układu należy sformułować równania bilansu ciepła i bilansu masy, co pozwoli uzyskać równania konstytutywne opisujące szybkość transportu. W tym celu należy przeanalizować wszystkie zjawiska fizyczne, jakie zachodzą podczas sprzężonego przewodzenia ciepła i masy. Sformułowanie bilansowe to typowe działanie pozwalające na uzyskanie równań stanu, (patrz Kącki [64], Orzechowski, Prywer, Zarzycki [65], Zarzycki [63]). Sformułowanie bilansu ciepła można przedstawić w następującej postaci:

$$C_{Dop} + C_{Zr} - C_{Aku} = C_{Odp} \quad (98)$$



Rys. 36. Transport ciepła i masy w trójwymiarowym wyrobie włókienniczym: a) obciążenia temperaturą zewnętrzną i wektorem gęstości strumienia masy, b) płaski przekrój ubioru wielowarstwowego; 1, 3, 5 – warstwy materiału, 2 – źródła ciepła (elementy grzejące), 4 – źródła masy (mikrokapsuły)

Źródło: opracowanie własne.

W tym związku  $C_{Dop}$  oznacza ciepło doprowadzane z masą do wyrobu włókienniczego,  $C_{Zr}$  to ciepło emitowane przez źródło,  $C_{Odp}$  – ciepło odprowadzone na zewnątrz materiału,  $C_{Aku}$  – ciepło akumulowane wewnątrz materiału kompozytowego. W przypadku ubioru ciepło jest transportowane z masą i pochodzi z ciała człowieka o określonej temperaturze i poziomie wilgotności. Wilgoć przemieszcza się przez absorpcję z powierzchni włókien do materiału i desorpcję do wolnych przestrzeni między włóknami, co jest opisywane przez ciepło sorpcji/desorpcji pary wodnej na powierzchni włókien  $\lambda_w$ ,  $J \text{ kg}^{-1}$  oraz bezwymiarową porowatość materiału  $\varepsilon$ . Transport masy z ciepłem nie jest znaczący i uwzględnia się go tylko na poziomie cząsteczkowym. Składnik  $C_{Dop}$  doprowadzonego ciepła można zapisać następująco:

$$C_{Dop} = \int_{\Omega} \lambda_w (1 - \varepsilon) \frac{dw_f}{dt} d\Omega. \quad (99)$$

Źródło ciepła występuje dość rzadko w ubiorze i ma charakter ogrzewania w warunkach ekstremalnych (polarnicy, praca w chłodniach, wojsko, praca zimą na zewnątrz itp.). Ciepło emitowane przez źródło o wydajności  $f(\mathbf{x}, t)$ ,  $J \text{ s}^{-1}$ , w materiale o obszarze  $\Omega$  można opisać zależnością:

$$C_{Zr} = \int_{\Omega} f(\mathbf{x}, t) d\Omega. \quad (100)$$

Ciepło odprowadzane na zewnątrz materiału zajmującego obszar  $\Omega$  ograniczonego brzegiem zewnętrznym  $\Gamma$  ma postać:

$$C_{Odp} = \int_{\Gamma} \mathbf{q}(\mathbf{x}, t) d\Gamma = \int_{\Gamma} [\mathbf{A}(\mathbf{x}, t) \cdot \nabla T(\mathbf{x}, t) + \mathbf{q}^*(\mathbf{x}, t)] d\Gamma. \quad (101)$$

W powyższym związku  $\mathbf{A}(\mathbf{x}, t)$  to macierz współczynników przewodzenia ciepła dla materiału wyrobu,  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ,  $\nabla$  oznacza operator gradientowy (nabla),  $\mathbf{q}^*$  to wektor wstępnej gęstości strumienia ciepła,  $W \cdot m^{-2}$ . Składnik ciepła akumulowanego w materiale włókien można zapisać zależnością:

$$C_{Aku} = \int_{\Omega} \rho c \frac{dT}{dt} d\Omega, \quad (102)$$

gdzie:  $\rho$  to gęstość materiału włókien,  $kg \cdot m^{-3}$ ,  $c$  – pojemność cieplna materiału,  $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ . Zestawiając poszczególne składniki można bilans ciepła zapisać następująco:

$$\int_{\Omega} \lambda_w (1 - \varepsilon) \frac{dw_f}{dt} d\Omega - \int_{\Omega} \rho c \frac{dT}{dt} d\Omega + \int_{\Omega} f d\Omega = \int_{\Gamma} \mathbf{q}(\mathbf{x}, t) d\Gamma, \quad (103)$$

$$\mathbf{q}(\mathbf{x}, t) = \mathbf{A} \cdot \nabla T(\mathbf{x}, t) + \mathbf{q}^*(\mathbf{x}, t).$$

Stosując w powyższej zależności twierdzenie Ostrogradskiego-Gausa i zakładając ciągłość wszystkich funkcji podcałkowych, otrzymuje się równanie transportu ciepła w postaci:

$$\begin{cases} \rho c \frac{dT}{dt} - \lambda_w (1 - \varepsilon) \frac{dw_f}{dt} = -\operatorname{div} \mathbf{q}(\mathbf{x}, t) + f(\mathbf{x}, t) \\ \mathbf{q}(\mathbf{x}, t) = \mathbf{A} \cdot \nabla T(\mathbf{x}, t) + \mathbf{q}^*(\mathbf{x}, t) \end{cases} \quad (104)$$

W podobny sposób jest rozważany bilans transportu wilgoci (pary wodnej), który również pozwala sformułować równanie konstytutywne. Szczególny przypadek to materiały zmiany fazy w postaci mikrokapsuł. Masa (ciecz) jest z nich uwalniana pod wpływem dyfuzji wilgoci i przemieszcza się w dowolnym kierunku. Warunek jej uwolnienia to uwolnienie masy z mikrokapsuł, co następuje pod wpływem czynnika aktywującego. Część masy jest odprowadzana na zewnątrz materiału, część akumulowana w przestrzeniach między włóknami, część akumulowana w materiale włókien. Bilans transportu masy zapisuje się zależnością:

$$M_{Zr} = M_{Odp} + M_{Aku\ w\ l} + M_{Aku\ prz} \quad (105)$$

W tej zależności  $M_{Zr}$  oznacza masę emitowaną przez źródło,  $M_{Odp}$  to masa odprowadzona na zewnątrz materiału,  $M_{Aku\ w\ l}$  – masa akumulowana we włóknach,  $M_{Aku\ prz}$  – masa akumulowana w przestrzeniach między włóknami. Masę emitowaną przez źródło o wydajności  $f_w(\mathbf{x}, t)$ ,  $kg \cdot s^{-1}$ , w materiale zajmującym obszar  $\Omega$  można opisać jako zależność:

$$M_{Zr} = \int_{\Omega} f_w(\mathbf{x}, t) d\Omega. \quad (106)$$

Masę odprowadzaną na zewnątrz materiału można zapisać w postaci związku:

$$M_{Odp} = \int_{\Gamma} \mathbf{q}_w(\mathbf{x}, t) d\Gamma = \int_{\Gamma} [D \nabla w_f(\mathbf{x}, t) + \mathbf{q}_w^*(\mathbf{x}, t)] d\Gamma. \quad (107)$$

W powyższym związku  $D$  to współczynnik dyfuzji pary wodnej,  $m^2 \cdot s^{-1}$ ,  $\nabla$  oznacza operator gradientowy (nabla),  $\mathbf{q}_w^*$  to wektor wstępnej gęstości strumienia masy,  $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$ . Masa pochłaniana przez materiał włókien zależy od ich porowatości i przyrostu stężenia masy (pary wodnej) we włóknach w czasie. Zjawisko to można opisać następującym równaniem:

$$M_{Aku\ w\ l} = \int_{\Omega} (1 - \varepsilon) \frac{dw_f}{dt} d\Omega, \quad (108)$$

gdzie:  $\varepsilon$  oznacza bezwymiarową efektywną porowatość materiału włókienniczego,  $dw_f/dt$  to przyrost stężenia pary wodnej we włóknach w czasie. Podobnie

pochłanianie masy (pary wodnej) w wolnych przestrzeniach między włóknami to funkcja porowatości materiału włókienniczego oraz stężenia pary wodnej w tych przestrzeniach. Proces ten można opisać za pomocą równania:

$$M_{Aku\ prz} = \int_{\Omega} \varepsilon \frac{dw_a}{dt} d\Omega, \quad (109)$$

gdzie:  $\varepsilon$  oznacza bezwymiarową efektywną porowatość materiału włókienniczego,  $dw_a/dt$  to przyrost stężenia pary wodnej w przestrzeniach między włóknami w czasie. Poszczególne składniki bilansu masy (pary wodnej) można uwzględnić w bilansie i zapisać w postaci zależności:

$$\int_{\Omega} f_w(\mathbf{x}, t) d\Omega = \int_{\Omega} (1 - \varepsilon) \frac{dw_f}{dt} d\Omega + \int_{\Omega} \varepsilon \frac{dw_a}{dt} d\Omega + \int_{\Gamma} \mathbf{q}_w(\mathbf{x}, t) d\Gamma, \quad (110)$$

$$\mathbf{q}_w(\mathbf{x}, t) = D \nabla w_f(\mathbf{x}, t) + \mathbf{q}_w^*(\mathbf{x}, t).$$

Stosując w zależności bilansu twierdzenie Ostrogradskiego-Gaussa, przy założeniu ciągłości wszystkich funkcji podcałkowych, otrzymuje się równanie konstytutywne w postaci:

$$(1 - \varepsilon) \frac{dw_f}{dt} + \varepsilon \frac{dw_a}{dt} = -\text{div} \mathbf{q}_w(\mathbf{x}, t) + f_w(\mathbf{x}, t), \quad (111)$$

$$\mathbf{q}_w(\mathbf{x}, t) = D \nabla w_f(\mathbf{x}, t) + \mathbf{q}_w^*(\mathbf{x}, t).$$

Zestawione zbiorczo równania konstytutywne to z punktu widzenia fizycznego związku opisujące sprzężony transport ciepła i masy (pary wodnej) dla wielowarstwowego materiału włókienniczego, z założeniem istnienia źródeł ciepła i masy. Mogą one być zapisane w postaci (patrz Korycki [57]):

$$\begin{cases} (1 - \varepsilon) \frac{dw_f}{dt} + \varepsilon \frac{dw_a}{dt} = -\text{div} \mathbf{q}_w + f_w; & \mathbf{q}_w = D \nabla w_f + \mathbf{q}_w^*; \\ \rho c \frac{dT}{dt} - \lambda_w (1 - \varepsilon) \frac{dw_f}{dt} = -\text{div} \mathbf{q} + f; & \mathbf{q} = \mathbf{A} \cdot \nabla T + \mathbf{q}^*. \end{cases} \quad (112)$$

Wektory  $\mathbf{q}^*$  wstępnej gęstości strumienia ciepła,  $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$  i  $\mathbf{q}_w^*$  wstępnej gęstości strumienia masy,  $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$ , mają sens fizyczny odnoszący się tylko do pewnych założeń analizy wrażliwości. Równania konstytutywne muszą mieć jednorodną formę zapisu we wszystkich obszarach analizy wrażliwości. Ponieważ zagadnieniach dodatkowych w metodzie bezpośredniej i sprzężonych w metodzie układów sprzężonych występują dodatkowe, niezrównoważone pola stanu, więc dla ujednoczenia postaci tych równań wprowadza się oba powyższe wektory.

Jak zostało określone wcześniej, sprzężone przewodzenie masy i ciepła jest opisane przez trzy zmienne stanu: stężenie pary wodnej we włóknach  $w_f$ ; stężenie pary wodnej w przestrzeniach między włóknami  $w_a$ ; temperaturę  $T$ . Dla uzyskania jednoznacznego rozwiązania problemu konieczne jest wprowadzenie trzeciej zależności, wiążącej ze sobą zmienne stanu. Punkt wyjścia to związek empiryczny określony dla materiałów włókienniczych przez David i Nordon [66], Li [59], Li i Luo [67], Li i Holcombe [68]. Jest to matematyczny zapis dwuetapowego procesu sorpcji we włóknach, który zależy od wartości granicznych trzech parametrów: bezwymiarowego współczynnika proporcjonalności  $p$ , czasu równowagi  $t_{eq}$ ,  $s$  oraz stężenia pary wodnej w przestrzeniach między włóknami  $w_a$ ,  $kg \cdot m^{-3}$ . Ma on postać:

$$\frac{dw_f}{dt} = (1-p)R_1 + pR_2; \quad \begin{array}{l} p=0 \text{ gdy } w_a < 0,185 \text{ oraz } t < t_{eq}; \\ p=0,5 \text{ gdy } w_a \geq 0,185 \text{ oraz } t < t_{eq}; \\ p=1 \text{ gdy } t > t_{eq}. \end{array} \quad (113)$$

Graniczna wartość stężenia pary wodnej w przestrzeniach między włóknami jest stała. Czas równowagi  $t_{eq}$  określa się w sposób doświadczalny dla różnych wyrobów włókienniczych, np. wełny Li, Luo [67]; dla innych materiałów patrz Haghi [69]. Nie są znane uogólnienia teoretyczne tych zależności doświadczalnych.

Pierwsza faza procesu sorpcji jest określona za pomocą prawa Ficka. Dla uproszczenia zakłada się regularny, walcowy kształt włókna i przenikanie wilgoci (pary wodnej) wyłącznie symetrycznie w kierunku promieniowym od powierzchni zewnętrznej do środka za pomocą wydatku  $R_1$ ,  $kg \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}$ . Zapis ten według Cranka [70] ma postać:

$$R_1(\mathbf{x}, t) = \frac{dw_f}{dt} = \frac{1}{r} \frac{d(rD_f dw_f)}{dr^2}. \quad (114)$$

Dla uproszczenia wprowadza się zasadę chwilowej równowagi termodynamicznej w skali mikro między włóknami i czynnikiem w wolnych przestrzeniach między nimi. Tak więc podstawowe parametry układu są wówczas ustalone, jak przy chwilowym założeniu braku transportu. Pozwala to zapisać związek między stężeniami pary wodnej na powierzchniach włókien i w wolnych przestrzeniach między nimi (patrz Li [59], Crank [70]) w postaci:

$$w_f = \rho\beta w_a. \quad (115)$$

W równaniu tym  $\beta$  to bezwymiarowy współczynnik aproksymacji, niezależny od zmiennych stanu,  $\rho$  to gęstość materiału włókien,  $kg \cdot m^{-3}$ . Różniczkując związek (115) obustronnie względem czasu, otrzymuje się następujący związek opisujący pierwszą fazę procesu sorpcji dla sprzężonego problemu przewodzenia masy i ciepła (patrz Korycki [58]) w postaci:

$$\begin{cases} \left(1 - \varepsilon + \frac{\varepsilon}{\beta\rho}\right) \frac{dw_f}{dt} = -\operatorname{div}\mathbf{q}_w + f_w; & \mathbf{q}_w = D \nabla w_f + \mathbf{q}_w^*; \\ c \frac{dT}{dt} + \lambda_w (1 - \varepsilon) \frac{dw_f}{dt} = -\operatorname{div}\mathbf{q} + f; & \mathbf{q} = \mathbf{A} \cdot \nabla T + \mathbf{q}^*. \end{cases} \quad (116)$$

Regularność procesu, jak i wynikająca stąd jednoznaczność i precyzja zapisu, jest jednak ograniczona do krótkiej, pierwszej fazy procesu sorpcji. Druga faza procesu sorpcji jest bardziej stochastyczna, zależy od wydatku wilgoci podczas tej fazy. Matematycznie można zapisać ją następująco (z wykorzystaniem Li [59]):

$$\begin{cases} \left(1 - \varepsilon + \frac{\varepsilon}{\eta}\right) \frac{dw_f}{dt} = -\operatorname{div}\mathbf{q}_w + f_w; & \mathbf{q}_w = \mathbf{D} \cdot \nabla w_f + \mathbf{q}_w^*; \\ \rho c \frac{dT}{dt} + \lambda_w (1 - \varepsilon) \frac{dw_f}{dt} = -\operatorname{div}\mathbf{q} + f; & \mathbf{q} = \mathbf{A} \cdot \nabla T + \mathbf{q}^*. \end{cases} \quad (117)$$

W związku tym  $s_l, s_2$  to bezwymiarowe współczynniki empiryczne opisujące drugą fazę procesu sorpcji,  $H_a$  – bezwymiarowa względna wilgotność powietrza,  $H_f$  – bezwymiarowa względna wilgotność materiału włókien. Wszystkie te wielkości można określić wyłącznie doświadczalnie dla znanych charakterystyk materiału oraz warunków transportu ciepła i masy.

Dla prostszego określenia opisu matematycznego drugiej fazy procesu sorpcji należy poddać analizie wchłanianie wilgoci, czyli transport masy. Niezależnie od kierunku przekazywania wilgoci na styku włókna – przestrzenie między włóknami zakłada się istnienie stanu równowagi termodynamicznej między tymi elementami. Dlatego na tych powierzchniach można założyć takie same wartości ciśnienia nasyconej pary wodnej  $E_a = E_f$  oraz temperatury  $T_a = T_f$ . Rozpatrując stosunki stężeń wilgoci (pary wodnej)  $w_f, w_a$  i wilgotności względnych  $H_f, H_a$ , można zapisać następujące związki:

$$w_f = \mu \frac{e_f}{T_f}; \quad w_a = \mu \frac{e_a}{T_a}; \quad H_f = \frac{e_f}{E_f}; \quad H_a = \frac{e_a}{T_a}; \quad \frac{w_f}{w_a} = \frac{e_f}{e_a} = \eta; \quad \frac{H_f}{H_a} = \frac{e_f}{e_a} = \eta, \quad (118)$$

gdzie  $\mu = 38582,80$  to współczynnik liczbowy,  $e$  – ciśnienie pary wodnej,  $P_a$ ,  $E$  – ciśnienie nasyconej pary wodnej,  $P_a$ ,  $\eta$  – bezwymiarowy współczynnik proporcjonalności, czyli współczynnik sorpcji/desorpcji pary wodnej na styku włókien i przestrzeni między nimi. Różniczkując piąte równanie w związkach (118) obustronnie względem czasu oraz wykorzystując związek (112), otrzymuje się opis matematyczny drugiej fazy procesu sorpcji dla sprzężonego problemu przewodzenia masy i ciepła (patrz Korycki [58]):

$$\begin{cases} \left(1 - \varepsilon + \frac{\varepsilon}{\rho\eta}\right) \frac{dw_f}{dt} = -\operatorname{div}\mathbf{q}_w + f_w; & \mathbf{q}_w = D \nabla w_f + \mathbf{q}_w^*; \\ c \frac{dT}{dt} + \lambda_w (1 - \varepsilon) \frac{dw_f}{dt} = -\operatorname{div}\mathbf{q} + f; & \mathbf{q} = \mathbf{A} \cdot \nabla T + \mathbf{q}^*. \end{cases} \quad (119)$$

Bezpośrednie porównanie związków (116) i (119) pokazuje ich dużą zbieżność, która pozwala na następujący wspólny zapis:

$$\begin{cases} \left(1 - \varepsilon + \frac{\varepsilon}{\tau\eta}\right) \frac{dw_f}{dt} = -\operatorname{div}\mathbf{q}_w + f_w; & \mathbf{q}_w = D \nabla w_f + \mathbf{q}_w^*; \\ c \frac{dT}{dt} + \lambda_w (1 - \varepsilon) \frac{dw_f}{dt} = -\operatorname{div}\mathbf{q} + f; & \mathbf{q} = \mathbf{A} \cdot \nabla T + \mathbf{q}^*. \end{cases} \quad (120)$$

W zależności (120) wprowadza się oznaczenia  $\tau = \beta$  dla pierwszej fazy i  $\tau = \eta$  dla drugiej fazy procesu sorpcji. Dla rozwiązania problemu należy następnie zdefiniować warunek początkowy i warunki brzegowe, które są zależne od położenia wyrażonego wektorem współrzędnych  $\mathbf{x}$  i czasu  $t$ . Warunek brzegowy pierwszego rodzaju określa zmienne stanu: temperaturę  $T$  na części brzegu  $\Gamma_T$  i stężenie pary wodnej we włóknach  $w_f$  na odcinku brzegu  $\Gamma_l$ , w postaci:

$$T(\mathbf{x}, t) = T^0(\mathbf{x}, t) \quad \mathbf{x} \in \Gamma_T; \quad w_f(\mathbf{x}, t) = w_f^0(\mathbf{x}, t) \quad \mathbf{x} \in \Gamma_l. \quad (121)$$

W powyższym związku  $T^0$  oraz  $w_f^0$  oznaczają określone wartości zmiennych stanu: temperatury i stężenia pary wodnej. Warunek brzegowy drugiego rodzaju określa gęstości strumienia ciepła w kierunku normalnym do fragmentu brzegu  $\Gamma_q$  oraz gęstości strumienia masy w kierunku normalnym do części brzegu  $\Gamma_2$  w postaci:

$$q_n(\mathbf{x}, t) = \mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = q_n^0(\mathbf{x}, t) \quad \mathbf{x} \in \Gamma_q; \quad q_{mw}(\mathbf{x}, t) = \mathbf{n} \cdot \mathbf{q}_w = q_{mw}^0(\mathbf{x}, t) \quad \mathbf{x} \in \Gamma_2. \quad (122)$$

gdzie  $\mathbf{n}$  to jednostkowy wektor normalny do brzegu zewnętrznego  $\Gamma$  o zwrocie dodatnim na zewnątrz obszaru  $\Omega$  ograniczonego tym brzegiem,  $\mathbf{q}$  – wektor gęstości strumienia ciepła,  $W \cdot m^{-2}$ ,  $\mathbf{q}_w$  – wektor gęstości strumienia masy,  $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$ ,  $q_n^0$  i  $q_{mw}^0$  – określone wartości gęstości strumieni ciepła i masy w kierunku normalnym do brzegu. Warunek brzegowy trzeciego rodzaju określa gęstości konwekcyjnych strumieni: ciepła w kierunku normalnym do części brzegu  $\Gamma_C$  oraz masy w kierunku normalnym do fragmentu brzegu  $\Gamma_3$ , w postaci:

$$q_n(\mathbf{x}, t) = h[T(\mathbf{x}, t) - T_\infty(\mathbf{x}, t)] \quad \mathbf{x} \in \Gamma_C; \quad q_{mw}(\mathbf{x}, t) = h_w[w_f(\mathbf{x}, t) - w_{f\infty}(\mathbf{x}, t)] \quad \mathbf{x} \in \Gamma_3. \quad (123)$$



W tej zależności  $h$  oznacza współczynnik przejmowania ciepła podczas konwekcji,  $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ,  $h_w$  – współczynnik dyfuzji masy (pary wodnej) w powietrzu,  $m \cdot s^{-1}$ ,  $T_\infty(\mathbf{x}, t)$  to temperatura otoczenia,  $^\circ C$ ,  $w_{f\infty}(\mathbf{x}, t)$  – stężenie pary wodnej w otoczeniu,  $^\circ C$ . Warunek promieniowania na fragmencie  $\Gamma_r$  brzegu zewnętrznego dotyczy tylko transportu ciepła, opisanego w postaci klasycznej jako iloczyn czwartej potęgi temperatury i stałej Stefana-Boltzmana w postaci:

$$q_n^r(\mathbf{x}, t) = \sigma T(\mathbf{x}, t)^4 \quad \mathbf{x} \in \Gamma_r, \quad (124)$$

gdzie  $\sigma$  oznacza stałą Stefana-Boltzmana,  $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$ . Warunek brzegowy czwartego rodzaju określa równość zmiennych stanu na brzegach wewnętrznych  $\Gamma_4$  wyrobu wielowarstwowego w postaci:

$$T^{(i)}(\mathbf{x}, t) = T^{(i+1)}(\mathbf{x}, t) \quad \mathbf{x} \in \Gamma_4; \quad w_f^{(i)}(\mathbf{x}, t) = w_f^{(i+1)}(\mathbf{x}, t) \quad \mathbf{x} \in \Gamma_4. \quad (125)$$

W zależności tej symbole  $(i)$  oraz  $(i + 1)$  oznaczają numery kolejnych warstw materiału. Warunek początkowy opisuje rozkład zmiennych stanu: temperatury  $T$  oraz stężenia pary wodnej we włóknach  $w_f$  na początku procesu przewodzenia ciepła i masy, w postaci:

$$T(\mathbf{x}, 0) = T_0(\mathbf{x}, 0) \quad \mathbf{x} \in (\Omega \cup \Gamma); \quad w_f(\mathbf{x}, 0) = w_{f0}(\mathbf{x}, 0) \quad \mathbf{x} \in (\Omega \cup \Gamma), \quad (126)$$

gdzie  $T_0$  i  $w_{f0}$  oznaczają wartości początkowe zmiennych stanu.

### 1.11.5.2. Uproszczenia modelu matematycznego

W przypadku problemów ustalonych, wszystkie wartości zmiennych stanu są stałe w czasie. Dlatego pochodne czasowe występujące po lewej stronie obu równań w zależności (120) są równe zero. Pozwala to na zapisanie związku (120) w następującej postaci:

$$\begin{cases} -\operatorname{div} \mathbf{q}_w + f_w = 0; & \mathbf{q}_w = D \nabla w_f + \mathbf{q}_w^*; \\ -\operatorname{div} \mathbf{q} + f = 0; & \mathbf{q} = \mathbf{A} \cdot \nabla T + \mathbf{q}^*. \end{cases} \quad (127)$$

Kolejne uproszczenie następuje wówczas, gdy kompozytowa konstrukcja ubioru nie zawiera źródeł ciepła i masy. Wtedy równania konstytutywne mają postać:

$$\begin{cases} \operatorname{div}(D \nabla w_f + \mathbf{q}_w^*) = 0; \\ \operatorname{div}(\mathbf{A} \cdot \nabla T + \mathbf{q}^*) = 0. \end{cases} \quad (128)$$

Zakładając niezależność od zmiennych projektowania: współczynnika dyfuzji pary wodnej  $D$ , macierzy współczynników przewodzenia ciepła  $\mathbf{A}$ , wektora wstępnej gęstości strumienia ciepła  $\mathbf{q}^*$  oraz wektora wstępnej gęstości strumienia masy  $\mathbf{q}_w^*$ , można zapisać uproszczoną postać równań transportu, jako:

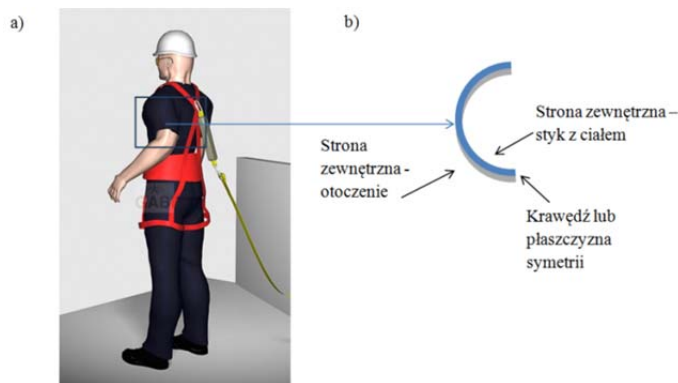
$$\begin{cases} D\nabla^2 w_f = 0; \\ \mathbf{A} \cdot \nabla^2 T = 0, \end{cases} \quad (129)$$

gdzie  $\nabla^2$  to gradient drugiego rzędu odpowiednich zmiennych stanu. W przypadku problemu ustalonego przewodzenia ciepła i masy nie są konieczne warunki początkowe. Warunki brzegowe są wyłącznie funkcją geometrii konstrukcji, co można przedstawić zbiorczo w postaci układu równań:

$$\begin{aligned} T(\mathbf{x}) &= T^0(\mathbf{x}) \quad \mathbf{x} \in \Gamma_T; \quad w_f(\mathbf{x}) = w_f^0(\mathbf{x}) \quad \mathbf{x} \in \Gamma_1; \\ q_n(\mathbf{x}) &= \mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = q_n^0(\mathbf{x}) \quad \mathbf{x} \in \Gamma_q; \quad q_{nw}(\mathbf{x}) = \mathbf{n} \cdot \mathbf{q}_w = q_{nw}^0(\mathbf{x}) \quad \mathbf{x} \in \Gamma_2; \\ q_n(\mathbf{x}) &= h[T(\mathbf{x}) - T_\infty(\mathbf{x})] \quad \mathbf{x} \in \Gamma_c; \quad q_{mw}(\mathbf{x}) = h_w[w_f(\mathbf{x}) - w_{f\infty}(\mathbf{x})] \quad \mathbf{x} \in \Gamma_3; \\ q_n'(\mathbf{x}) &= \sigma T(\mathbf{x})^4 \quad \mathbf{x} \in \Gamma_r; \\ T^{(i)}(\mathbf{x}) &= T^{(i+1)}(\mathbf{x}) \quad \mathbf{x} \in \Gamma_4; \quad w_f^{(i)}(\mathbf{x}) = w_f^{(i+1)}(\mathbf{x}) \quad \mathbf{x} \in \Gamma_4. \end{aligned} \quad (130)$$

### 1.11.5.3. Najbardziej typowe postacie warunków brzegowych

Przedstawione warunki brzegowe i początkowe mają charakter ogólny. Jednak w przypadku ubiorów ochronnych występuje ich charakterystyczna powtarzalność. Jest ona zbliżona, niezależnie od skali rozpatrywanego problemu – przestrzennej trójwymiarowej 3D lub płaskiej dwuwymiarowej 2D. Problem przestrzenny jest rozpatrywany w przypadku całości ubioru lub znacznej jego części (rysunek 37). Problem płaski występuje wówczas, gdy na jakiejś powierzchni występuje powtarzalność kształtu oraz warunków brzegowych gwarantująca sprowadzenie konstrukcji do jej dowolnego przekroju płaszczyzną prostopadłą do powierzchni skóry użytkownika.



Rys. 37. Schemat człowieka w ubiorze ochronnym: a) widok ogólny, b) schemat fragmentu odzieży (rękawa)

Źródło: <http://www.bhp-gabi.pl/p4400,kotwa-at-150-protekt.html>

Warunki brzegowe zależą od aktualnego stanu organizmu użytkownika oraz warunków otoczenia. Załóżmy, że aktualny stan organizmu człowieka odpowiada słabej aktywności fizycznej, np. na początku pracy. Warunki otoczenia to brak opadów (umiarkowana wilgotność) i temperatura  $T_\infty = 20^\circ\text{C}$ . Jedna ze stron zewnętrznych styka się z ciałem użytkownika. W przypadku ubioru luźniejszego występuje wolna przestrzeń między wewnętrzną powierzchnią ubioru i powierzchnią skóry. Przestrzeń ta jest wypełniona warstwą płynu – powietrzem lub potem i ma określone wartości zmiennych stanu, np. powietrze w warunkach normalnych o temperaturze  $T = 33^\circ\text{C}$  i stężeniu wilgoci odpowiadającym aktualnemu wydzielaniu potu przez człowieka. Jeśli ubiór jest dokładnie dopasowany, to zmienne stanu na powierzchni wewnętrznej są równe wartościom określonym dla skóry. Strona zewnętrzna, otwarta na otoczenie, jest obciążona konwekcją ciepła i masy z powierzchni ubioru do otoczenia. Jednocześnie występuje również promieniowanie (radiacja) ciepła z powierzchni ubioru do otoczenia. Powierzchnie boczne ubioru to krawędzie lub umowne powierzchnie symetrii. Krawędzie ubioru są z reguły odpowiednio wykończone, co zapobiega utracie ciepła. Dlatego są one obciążone pomijalnie małą konwekcją ciepła i masy do otoczenia. Można założyć, że na krawędzi występuje warunek brzegowy drugiego rodzaju, czyli gęstości strumieni ciepła i masy są równe zero. Jeśli powierzchnie boczne są powierzchniami symetrii, to zakłada się jednokierunkowy transport ciepła i masy, od powierzchni skóry do otoczenia. Zgodnie z charakterem transportu, gęstości strumieni ciepła i masy na powierzchniach bocznych są także równe zero. Brzegi wewnętrzne występują wyłącznie, gdy ubiór jest wielowarstwowym kompozytem. Zbiorcza postać warunków brzegowych i początkowych jest następująca:

*brzeg zewnętrzny – skóra:*

$$T(\mathbf{x}, t) = T^0(\mathbf{x}, t) \quad \mathbf{x} \in \Gamma_r; \quad w_f(\mathbf{x}, t) = w_f^0(\mathbf{x}, t) \quad \mathbf{x} \in \Gamma_1;$$

*brzeg zewnętrzny – otoczenie:*

$$q_n^r(\mathbf{x}, t) = \sigma T(\mathbf{x}, t)^4 \quad \mathbf{x} \in \Gamma_r,$$

$$q_n(\mathbf{x}, t) = h[\Gamma(\mathbf{x}, t) - T_\infty(\mathbf{x}, t)] \quad \mathbf{x} \in \Gamma_c; \quad q_{mw}(\mathbf{x}, t) = h_w[w_f(\mathbf{x}, t) - w_{f\infty}(\mathbf{x}, t)] \quad \mathbf{x} \in \Gamma_3;$$

*brzegi boczne:*

$$q_n(\mathbf{x}, t) = 0 \quad \mathbf{x} \in \Gamma_q; \quad q_{mw}(\mathbf{x}, t) = 0 \quad \mathbf{x} \in \Gamma_2;$$

*brzeg wewnętrzny:*

$$T^{(i)}(\mathbf{x}, t) = T^{(i+1)}(\mathbf{x}, t) \quad \mathbf{x} \in \Gamma_4; \quad w_f^{(i)}(\mathbf{x}, t) = w_f^{(i+1)}(\mathbf{x}, t) \quad \mathbf{x} \in \Gamma_4;$$

*warunek początkowy:*

$$T(\mathbf{x}, 0) = T_0(\mathbf{x}, 0) \quad \mathbf{x} \in (\Omega \cup \Gamma); \quad w_f(\mathbf{x}, 0) = w_{f0}(\mathbf{x}, 0) \quad \mathbf{x} \in (\Omega \cup \Gamma).$$

(131)

Założmy następnie, że aktualny stan organizmu człowieka odpowiada słabej aktywności fizycznej, np. na początku pracy. Warunki otoczenia to opady (pełna wilgotność) i temperatura powietrza  $T_\infty = 20^\circ\text{C}$ . Strona zewnętrzna stykająca się z ciałem użytkownika jest ponownie rozpatrywana alternatywnie. W przypadku ubioru luźniejszego występuje wolna przestrzeń między wewnętrzną powierzchnią ubioru i powierzchnią skóry, wypełniona powietrzem lub potem o określonych wartościach zmiennych stanu. Jeśli ubiór jest dokładnie dopasowany, to zmienne stanu na powierzchni wewnętrznej są równe wartościom określonym

dla skóry. Jednak z uwagi na schłodzenie skóry jej temperatura maleje. Strona zewnętrzna otwarta na otoczenie jest poddana działaniu wilgoci o stężeniu  $w_{f\infty} = 100\%$ . Oznacza to, że wilgoć jest transportowana od zewnątrz do skóry użytkownika aż do wyrównania stężeń w całej konstrukcji ubioru. Jednocześnie konwekcja i promieniowanie ciepła nadal zachodzą z zewnętrznej powierzchni ubioru do otoczenia, chociaż współczynniki je opisujące ulegają zmianie w czasie. Pozostałe warunki pozostają bez zmian. Pozwala to na następujący zapis:

*brzeg zewnętrzny – skóra:*

$$T(\mathbf{x}, t) = T^0(\mathbf{x}, t) \quad \mathbf{x} \in \Gamma_T; \quad w_f(\mathbf{x}, t) = w_{f1}^0(\mathbf{x}, t) \quad \mathbf{x} \in \Gamma_1;$$

*brzeg zewnętrzny – otoczenie:*

$$q_n^r(\mathbf{x}, t) = \sigma T(\mathbf{x}, t)^4 \quad \mathbf{x} \in \Gamma_r,$$

$$q_n(\mathbf{x}, t) = h[T(\mathbf{x}, t) - T_\infty(\mathbf{x}, t)] \quad \mathbf{x} \in \Gamma_c; \quad w_f(\mathbf{x}, t) = w_{f2}^0(\mathbf{x}, t) \quad \mathbf{x} \in \Gamma_3;$$

$$w_{f1}^0(\mathbf{x}, t) < w_{f2}^0(\mathbf{x}, t)$$

*brzegi boczne:*

$$q_n(\mathbf{x}, t) = 0 \quad \mathbf{x} \in \Gamma_q; \quad q_{mv}(\mathbf{x}, t) = 0 \quad \mathbf{x} \in \Gamma_2;$$

*brzeg wewnętrzny:*

$$T^{(i)}(\mathbf{x}, t) = T^{(i+1)}(\mathbf{x}, t) \quad \mathbf{x} \in \Gamma_4; \quad w_f^{(i)}(\mathbf{x}, t) = w_f^{(i+1)}(\mathbf{x}, t) \quad \mathbf{x} \in \Gamma_4;$$

*warunek początkowy:*

$$T(\mathbf{x}, 0) = T_0(\mathbf{x}, 0) \quad \mathbf{x} \in (\Omega \cup \Gamma); \quad w_f(\mathbf{x}, 0) = w_{f0}(\mathbf{x}, 0) \quad \mathbf{x} \in (\Omega \cup \Gamma).$$

(132)

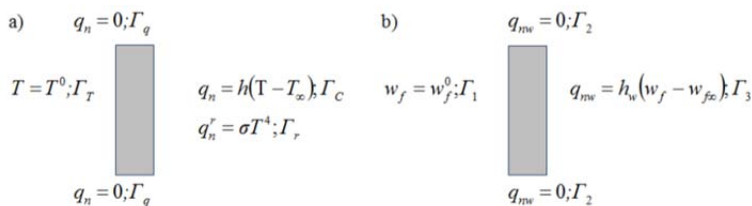
Dodatkowego komentarza wymaga zastosowanie membrany półprzepuszczalnej. Wówczas jest częściowo utrudniony transport wilgoci ze skóry do otoczenia, a jednocześnie blokowane przenikanie wilgoci z otoczenia do skóry. W takim przypadku następuje nasycenie wodą warstwy zewnętrznej materiału między membraną a otoczeniem, a następnie warstwy wewnętrznej między membraną a skórą.

### 1.11.6. Modelowanie numeryczne wybranych kompozycji materiałowych przeznaczonych na odzież dla strażaków

Powyższe rozważania teoretyczne można zilustrować praktycznie przyjmując określone dane wyrobów rzeczywistych. Rozpatrywany jest problem ustalonego przewodzenia ciepła i masy opisany równaniami różniczkowymi drugiego rzędu w uproszczonej postaci:

$$\begin{cases} D\nabla^2 w_f = 0; \\ \mathbf{A} \cdot \nabla^2 T = 0. \end{cases} \quad (133)$$

W tej zależności  $\nabla^2$  oznacza gradient drugiego rzędu temperatury i stężenia pary wodnej. Rozwiązanie równań różniczkowych wymaga wprowadzenia warunków brzegowych, które można graficznie przedstawić na rysunku 38.



Rys. 38. Warunki brzegowe ustalonego przewodzenia ciepła i masy w badanym wyrobie

Źródło: opracowanie własne.

Jeden z brzegów wewnętrznych kontaktuje się z płytą o stałych wartościach zmiennych stanu, czyli określonych wartościach temperatury i stężenia pary wodnej. Oznacza to, że na tych fragmentach brzegów są zapewnione warunki brzegowe pierwszego rodzaju. Badany obszar jest ograniczony brzegami bocznymi, które są opisane warunkami drugiego rodzaju. Transport ciepła i wilgoci odbywa się w jednym kierunku: od płyty, przez materiał na zewnątrz, do otoczenia. Dlatego gęstości strumieni ciepła i masy w kierunku normalnym do brzegu są w obu przypadkach równe zero, co oznacza brak wymiany ciepła i wilgoci z otoczeniem. Ciepło jest tracone do otoczenia na brzegu zewnętrznym przez konwekcję i promieniowanie, czyli istnieją tu warunki brzegowe trzeciego rodzaju i promieniowania. Wilgoć jest odprowadzana do otoczenia z tego fragmentu brzegu za pomocą konwekcji dyfuzyjnej, co oznacza warunek brzegowy trzeciego rodzaju. Ponieważ rozważane wcześniej wszystkie materiały podlegały homogenizacji, w efekcie której są jednowarstwowe, nie ma warunków brzegowych czwartego rodzaju na wspólnych fragmentach brzegów wewnętrznych. Rozważane jest ustalone przewodzenie ciepła i masy, co jest tożsame z brakiem warunków początkowych. Z uwagi na postać ogólną (132), układ warunków brzegowych może zostać uproszczony do ostatecznej postaci:

*brzeg zewnętrzny – płyta:*

$$T(\mathbf{x}) = T^0(\mathbf{x}) \quad \mathbf{x} \in \Gamma_T, \quad w_f(\mathbf{x}) = w_f^0(\mathbf{x}) \quad \mathbf{x} \in \Gamma_1;$$

*brzeg zewnętrzny – otoczenie:*

$$q_n^*(\mathbf{x}) = \sigma T(\mathbf{x})^4 \quad \mathbf{x} \in \Gamma_r, \tag{134}$$

$$q_n(\mathbf{x}) = h[T(\mathbf{x}) - T_\infty(\mathbf{x})] \quad \mathbf{x} \in \Gamma_c, \quad q_{nw}(\mathbf{x}) = h_w[w_f(\mathbf{x}) - w_{f\infty}(\mathbf{x})] \quad \mathbf{x} \in \Gamma_3;$$

*brzezi boczne:*

$$q_n(\mathbf{x}) = 0 \quad \mathbf{x} \in \Gamma_q, \quad q_{nw}(\mathbf{x}) = 0 \quad \mathbf{x} \in \Gamma_2.$$

Powyższe równania różniczkowe transportu (133) z warunkami brzegowymi (134) można rozwiązać analitycznie. Ponieważ przewodzenie ciepła i masy odbywa się wyłącznie w jednym kierunku: od płyty, przez materiał do otoczenia, więc transport jest jednokierunkowy. Upraszcza to zapis do jednowymiarowego, zmienna projektowania to teraz współrzędna odkładana prostopadłe do płyty oraz powierzchni zewnętrznej  $x$ . Równania różniczkowe transportu ciepła i masy (133) można zapisać następująco:

$$\frac{d^2T}{dx^2} = 0, \quad \frac{d^2w_f}{dx^2} = 0. \quad (135)$$

Po dwukrotnym scałkowaniu zależności (135) otrzymuje się związki:

$$\begin{aligned} \frac{dT}{dx} + C_1 &= 0; & T + C_1x + C_2 &= 0; \\ \frac{dw_f}{dx} + C_3 &= 0; & w_f + C_3x + C_4 &= 0. \end{aligned} \quad (136)$$

Wprowadzone wyżej stałe całkowania od  $C_1$  do  $C_4$  określa się stosując mieszane warunki brzegowe. Są to warunki pierwszego rodzaju na brzegu stykającym się z płytą, drugiego rodzaju na brzegach bocznych oraz trzeciego rodzaju na powierzchni zewnętrznej, która oddaje parę wodną i ciepło do otoczenia. Niech współrzędna początku wyrobu na styku z płytą będzie  $x=0$ , a powierzchni zewnętrznej  $x=L$ . Warunki brzegowe można zapisać w matematycznej postaci:

$$\begin{aligned} T|_{x=0} &= T^0, & w_f|_{x=0} &= w_f^0, \\ q_n &= -\lambda\varepsilon \frac{dT}{dx}\Big|_{x=L} = -h(T|_{x=L} - T_\infty), & q_{mw} &= -D\varepsilon \frac{dw_f}{dx}\Big|_{x=L} = -h_w(w_f|_{x=L} - w_{f\infty}) \end{aligned} \quad (137)$$

W powyższej zależności  $\varepsilon$  to efektywna porowatość wyrobu. Wprowadzając powyższe warunki brzegowe do zależności (136), uzyskuje się po przekształceniach następujące funkcje określające temperaturę i stężenie pary wodnej wewnątrz konstrukcji ubioru jednowarstwowego, zapisane w funkcji współrzędnej grubości  $x$ :

$$w_f = w_f^0 - \frac{h_w(w_f^0 - w_{f\infty})}{D\varepsilon - h_w L} x, \quad T = T^0 - \frac{h(T^0 - T_\infty)}{\lambda\varepsilon - hL} x. \quad (138)$$

Na obu krańcowych powierzchniach wyrobu otrzymuje się wartości wynikające z powyższych zależności, przyjmując odpowiednio współrzędne  $x=0$  oraz  $x=L$ , w postaci:

$$\begin{aligned} w_f|_{x=0} &= w_f^0, & T|_{x=0} &= T^0, \\ w_f|_{x=L} &= w_f^0 - \frac{h_w(w_f^0 - w_{f\infty})}{D\varepsilon - h_w L} L, & T|_{x=L} &= T^0 - \frac{h(T^0 - T_\infty)}{\lambda\varepsilon - hL} L. \end{aligned} \quad (139)$$

Zależności opisujące zmienne stanu to zależności liniowe współrzędnej  $x$ . Początkowe wartości zmiennych stanu (temperatury i stężenia pary wodnej) na płycie są pomniejszane o składnik proporcjonalny do odległości od płyty, czyli

grubość materiału. Funkcje te osiągają wartości minimalne w kompozycie dla współrzędnej  $x = L$ , czyli na powierzchni otwartej do otoczenia. Sposób ten jest możliwy do zastosowania z dobrą dokładnością dla transportu pary wodnej (wilgoci), jednak opis transportu ciepła jest obciążony pewnym błędem. Mieszane warunki brzegowe na brzegu swobodnym uwzględniają tylko konwekcję ciepła do otoczenia, nie bierze się pod uwagę promieniowania ciepła na brzegu zewnętrznym wyrobu. Klasyczny warunek promieniowania zawiera stałą Stefana-Boltzmana, która ma niewielką wartość, ale także czwartą potęgę temperatury wyrażonej w  $K$ . Dlatego zależność teoretyczną uzyskaną dla transportu ciepła wyłącznie z uwzględnieniem konwekcji można traktować orientacyjnie. Dla uzyskania wartości dokładnych równanie transportu ciepła należy rozwiązywać numerycznie, całkując w środowisku *Mathematica*. Jako pierwszy rozważony będzie rozkład temperatury dla różnych kompozycji materiałowych przeznaczonych na odzież dla strażaków. Temperatura płyty grzejnej została przyjęta równa  $T^0 = 35^\circ C$ , temperatura otoczenia  $T_\infty = 20^\circ C$ , stężenie pary wodnej w otoczeniu  $w_\infty = 65\%$ . Współczynnik konwekcji ciepła do otoczenia na brzegu zewnętrznym został przyjęty jako stały, równy  $h = 0,7 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ . Wartości temperatury na swobodnym brzegu zewnętrznym, uzyskane w wyniku symulacji dla różnych wyrobów oraz trzech efektywnych porowatości badanych wyrobów, zostały odpowiednio podane w tabeli 19 dla porowatości  $\varepsilon = 0,7$ , tabeli 20 dla  $\varepsilon = 0,8$ , tabeli 21 dla  $\varepsilon = 0,9$ . Zmiana efektywnej porowatości może modelować np. nieregularną gęstość włókien wyrobu.

Tabela 19. Temperatura na brzegu zewnętrznym dla różnych wyrobów oraz efektywnej porowatości  $\varepsilon = 0,7$

Lp.	Rodzaj wyrobu	Grubość $10^{-3}m$	Współ. przew. ciepła, $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	Temperatura brzegu, $^\circ C$
1	UTP-6 tkanina zewnętrzna	0,42	46,95	34,68
2	UTP-6 membrana	0,72	31,95	34,52
3	UTP-6 podszewka	2,34	7,33	32,74
4	UTP-7 Phoenix tkanina zewnętrzna	0,42	46,95	34,68
5	UTP-7 Phoenix membrana	0,54	30,49	34,50
6	UTP-7 Phoenix podszewka	2,34	7,33	32,74
7	UTP-9 Gold tkanina zewnętrzna	0,44	36,90	34,59
8	UTP-9 Gold membrana	1,74	14,53	33,92
9	UTP-9 Gold podszewka	2,26	8,56	33,09
10	UTP-6 układ trójwarstwowy	3,48	6,33	32,34
11	UTP-7 Phoenix układ trójwarstwowy	3,30	6,29	32,32
12	UTP-9 Gold układ trójwarstwowy	4,44	5,93	32,13

Tabela 20. Temperatura na brzegu zewnętrznym dla różnych wyrobów oraz efektywnej porowatości  $\varepsilon = 0,8$

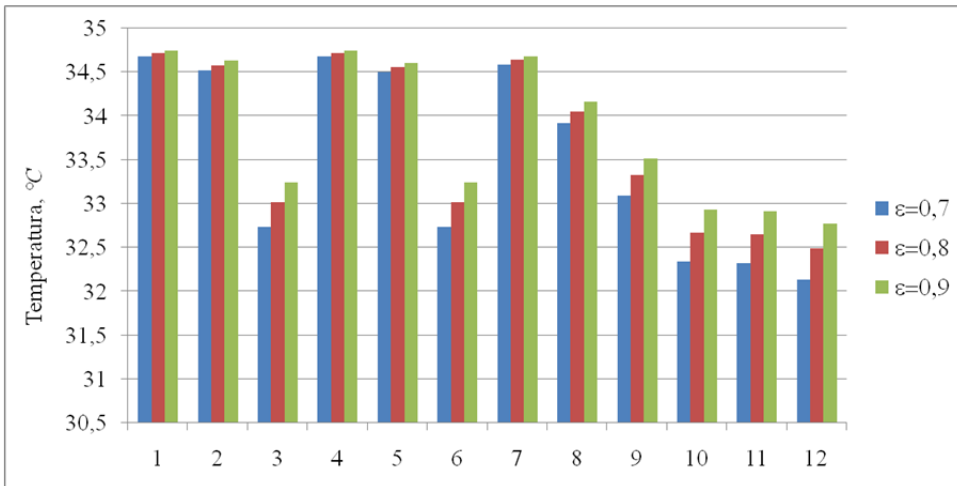
Lp.	Rodzaj wyrobu	Grubość $10^{-3}m$	Współ. przew. ciepła, $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	Temperatura brzegu, °C
1	UTP-6 tkanina zewnętrzna	0,42	46,95	34,72
2	UTP-6 membrana	0,72	31,95	34,58
3	UTP-6 podszewka	2,34	7,33	33,02
4	UTP-7 Phoenix tkanina zewnętrzna	0,42	46,95	34,72
5	UTP-7 Phoenix membrana	0,54	30,49	34,56
6	UTP-7 Phoenix podszewka	2,34	7,33	33,02
7	UTP-9 Gold tkanina zewnętrzna	0,44	36,90	34,64
8	UTP-9 Gold membrana	1,74	14,53	34,05
9	UTP-9 Gold podszewka	2,26	8,56	33,33
10	UTP-6 układ trójwarstwowy	3,48	6,33	32,67
11	UTP-7 Phoenix układ trójwarstwowy	3,30	6,29	32,65
12	UTP-9 Gold układ trójwarstwowy	4,44	5,93	32,49

Tabela 21. Temperatura na brzegu zewnętrznym dla różnych wyrobów oraz efektywnej porowatości  $\varepsilon = 0,9$

Lp.	Rodzaj wyrobu	Grubość, $10^{-3}m$	Współ. przew. ciepła, $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	Temperatura brzegu, °C
1	UTP-6 tkanina zewnętrzna	0,42	46,95	34,75
2	UTP-6 membrana	0,72	31,95	34,63
3	UTP-6 podszewka	2,34	7,33	33,24
4	UTP-7 Phoenix tkanina zewnętrzna	0,42	46,95	34,75
5	UTP-7 Phoenix membrana	0,54	30,49	34,61
6	UTP-7 Phoenix podszewka	2,34	7,33	33,24
7	UTP-9 Gold tkanina zewnętrzna	0,44	36,90	34,68
8	UTP-9 Gold membrana	1,74	14,53	34,16
9	UTP-9 Gold podszewka	2,26	8,56	33,52
10	UTP-6układ trójwarstwowy	3,48	6,33	32,93
11	UTP-7 Phoenixukład trójwarstwowy	3,30	6,29	32,91
12	UTP-9 Goldukład trójwarstwowy	4,44	5,93	32,77

Wynikająca z powyższych zestawień wrażliwość temperatury na brzegu swobodnym na efektywną porowatość wyrobu jest pokazana na rysunku 39.





Rys. 39. Wrażliwość temperatury na brzegu otwartym do otoczenia na efektywną porowatość

Źródło: opracowanie własne.

Uzyskane wyniki jednoznacznie wskazują, że temperatura uzyskana na brzegu zewnętrznym jest bardzo mało wrażliwa na efektywną porowatość wyrobu. Maksymalna różnica wynosi 1,8% dla wyrobu 12. Wrażliwość temperatury na porowatość rośnie, jeśli rośnie grubość materiału oraz maleje współczynnik przewodności cieplnej, patrz wyrób o numerach 10-12. Wyroby cienkie o dużym współczynniku przewodności cieplnej są znacznie mniej wrażliwe na zmiany porowatości niż materiały grubsze. W materiale cieńszym występują większe straty ciepła na skutek pochłaniania podczas transportu, patrz wyroby o numerach 1, 2, 4, 5. W dalszej kolejności została zbadana wrażliwość temperatury na brzegu otwartym do otoczenia na współczynnik konwekcji. Podobnie jak poprzednio została przyjęta temperatura płyty grzejnej równa  $T^0 = 35^\circ\text{C}$ , temperatura otoczenia  $T_\infty = 20^\circ\text{C}$ , stężenie pary wodnej w otoczeniu  $w_\infty = 65\%$ . Efektywną porowatość wyrobu założono teraz jako stałą  $\varepsilon = 0,7$ . Wartości temperatury na swobodnym brzegu zewnętrznym dla różnych wyrobów oraz różnych współczynników konwekcji ciepła zostały podane w: tabeli 22 dla  $h = 0,6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ , tabeli 21 dla  $h = 0,4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ , tabeli 24 dla  $h = 0,2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ . Zmienny współczynnik konwekcji może modelować np. obróbkę wykańczalniczą, która generuje powstanie warstw o różnych możliwościach przekazywania ciepła na zewnątrz.

Tabela 22. Temperatura na brzegu zewnętrznym dla różnych wyrobów oraz współczynnika konwekcji  $h = 0,6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$

Lp.	Rodzaj wyrobu	Grubość, $10^{-3}m$	Współ. przew. ciepła, $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$	Temperatura brzegu, °C
1	UTP-6 tkanina zewnętrzna	0,42	46,95	34,72
2	UTP-6 membrana	0,72	31,95	34,59
3	UTP-6 podszełka	2,34	7,33	33,09
4	UTP-7 Phoenix tkanina zewnętrzna	0,42	46,95	34,72
5	UTP-7 Phoenix membrana	0,54	30,49	34,57
6	UTP-7 Phoenix podszełka	2,34	7,33	33,09
7	UTP-9 Gold tkanina zewnętrzna	0,44	36,90	34,65
8	UTP-9 Gold membrana	1,74	14,53	34,08
9	UTP-9 Gold podszełka	2,26	8,56	33,39
10	UTP-6 układ trójwarstwowy	3,48	6,33	32,76
11	UTP-7 Phoenix układ trójwarstwowy	3,30	6,29	32,74
12	UTP-9 Gold układ trójwarstwowy	4,44	5,93	32,59

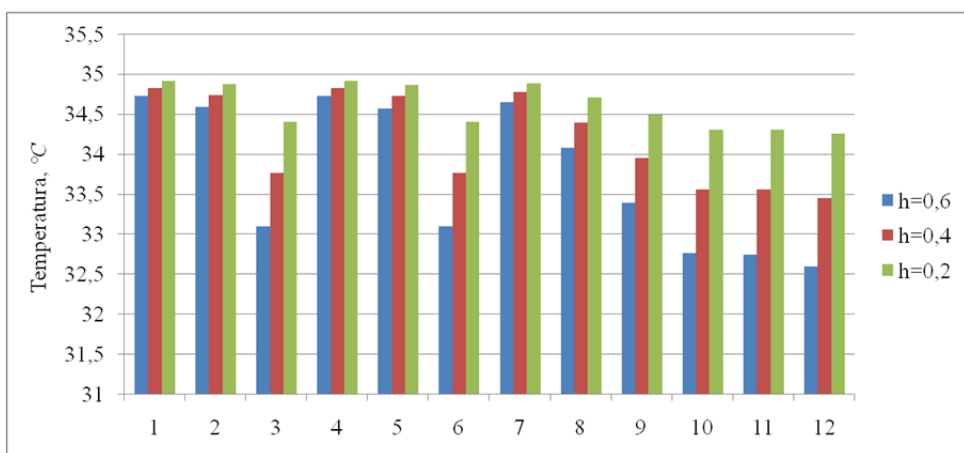
Tabela 23. Temperatura na brzegu zewnętrznym dla różnych wyrobów oraz współczynnika konwekcji  $h = 0,4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$

Lp.	Rodzaj wyrobu	Grubość, $10^{-3}m$	Współ. przew. ciepła, $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$	Temperatura brzegu, °C
1	UTP-6 tkanina zewnętrzna	0,42	46,95	34,82
2	UTP-6 membrana	0,72	31,95	34,73
3	UTP-6 podszełka	2,34	7,33	33,76
4	UTP-7 Phoenix tkanina zewnętrzna	0,42	46,95	34,82
5	UTP-7 Phoenix membrana	0,54	30,49	34,72
6	UTP-7 Phoenix podszełka	2,34	7,33	33,76
7	UTP-9 Gold tkanina zewnętrzna	0,44	36,90	34,77
8	UTP-9 Gold membrana	1,74	14,53	34,39
9	UTP-9 Gold podszełka	2,26	8,56	33,95
10	UTP-6 układ trójwarstwowy	3,48	6,33	33,55
11	UTP-7 Phoenix układ trójwarstwowy	3,30	6,29	33,55
12	UTP-9 Gold układ trójwarstwowy	4,44	5,93	33,45

Tabela 24. Temperatura na brzegu zewnętrznym dla różnych wyrobów oraz współczynnika konwekcji  $h = 0,2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$

Lp.	Rodzaj wyrobu	Grubość $10^{-3}m$	Współ. przew. ciepła, $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$	Temperatura brzegu, $^{\circ}\text{C}$
1	UTP-6 tkanina zewnętrzna	0,42	46,95	34,91
2	UTP-6 membrana	0,72	31,95	34,87
3	UTP-6 podszewka	2,34	7,33	34,40
4	UTP-7 Phoenix tkanina zewnętrzna	0,42	46,95	34,91
5	UTP-7 Phoenix membrana	0,54	30,49	34,86
6	UTP-7 Phoenix podszewka	2,34	7,33	34,40
7	UTP-9 Gold tkanina zewnętrzna	0,44	36,90	34,88
8	UTP-9 Gold membrana	1,74	14,53	34,70
9	UTP-9 Gold podszewka	2,26	8,56	34,49
10	UTP-6 układ trójwarstwowy	3,48	6,33	34,30
11	UTP-7 Phoenix układ trójwarstwowy	3,30	6,29	34,30
12	UTP-9 Gold układ trójwarstwowy	4,44	5,93	34,25

Wrażliwość temperatury na brzegu otwartym do otoczenia na współczynnik konwekcji ciepła została zestawiona na rysunku 40, na podstawie wyników z tabel 22-24.



Rys. 40. Wrażliwość temperatury na brzegu otwartym do otoczenia na współczynnik konwekcji

Źródło: opracowanie własne.

Uzyskane wyniki wskazują, że wrażliwość pola temperatury na współczynnik konwekcji jest stosunkowo duża, większa niż na efektywną porowatość wyrobu. Największe różnice wartości temperatury wynoszące około 5,1% występują dla wyrobu 12, wszystkie pozostałe są znacznie mniejsze. Wrażliwość temperatury na współczynnik konwekcji rośnie, jeśli grubość materiału rośnie i zmniejsza się współczynnik przewodności cieplnej, co można zaobserwować dla materiałów 10-12. Wyroby cienkie o dużym współczynniku przewodności cieplnej są znacznie mniej wrażliwe na zmiany porowatości niż materiały o dużej grubości, bo jest w nich większe pochłanianie ciepła podczas transportu przez materiał (patrz materiały: 1, 2, 4, 5). W następnej kolejności będzie określony rozkład stężenia pary wodnej dla różnych wyrobów. Dane dotyczące transportu wilgoci zostały przyjęte hipotetycznie, jako najbardziej typowe dla takiego przypadku. Stężenie pary wodnej na płycie zostało założone jako  $w_f^0 = 0,05 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , stężenie pary wodnej w otoczeniu jako  $w_{f\infty} = 0,005 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , współczynnik konwekcji pary wodnej do otoczenia jako  $h_w = 0,001 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Wartości stężenia pary wodnej na brzegu zewnętrznym otwartym do otoczenia zostały określone w wyniku symulacji dla różnych badanych wyrobów. Cel symulacji to również określenie wrażliwości stężenia pary wodnej na efektywną porowatość wyrobu. Dlatego zostały przyjęte trzy wartości porowatości  $\varepsilon = 0,7$  (tabela 25),  $\varepsilon = 0,8$  (tabela 26),  $\varepsilon = 0,9$  (tabela 27).

Tabela 25. Stężenie pary wodnej na brzegu zewnętrznym dla różnych wyrobów oraz efektywnej porowatości  $\varepsilon = 0,7$

Lp.	Rodzaj wyrobu	Grubość, $10^{-3} \text{ m}$	Współ. przew. pary wodnej, $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{Pa}^{-1}$	Stężenie pary wodnej, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
1	UTP-6 tkanina zewnętrzna	0,42	0,124	0,0498
2	UTP-6 membrana	0,72	0,152	0,0497
3	UTP-6 podszewka	2,34	0,060	0,0473
4	UTP-7 Phoenix tkanina zewnętrzna	0,42	0,124	0,0498
5	UTP-7 Phoenix membrana	0,54	0,067	0,0495
6	UTP-7 Phoenix podszewka	2,34	0,060	0,0473
7	UTP-9 Gold tkanina zewnętrzna	0,44	0,084	0,0497
8	UTP-9 Gold membrana	1,74	0,041	0,0471
9	UTP-9 Gold podszewka	2,26	0,063	0,0476
10	UTP-6 układ trójwarstwowy	3,48	0,027	0,0400
11	UTP-7 Phoenix układ trójwarstwowy	3,30	0,024	0,0390
12	UTP-9 Gold układ trójwarstwowy	4,44	0,022	0,0317

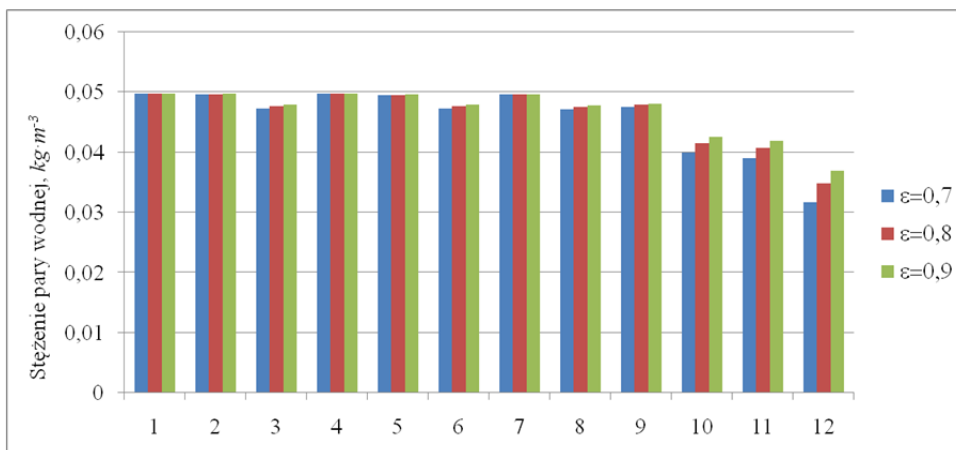
Tabela 26. Stężenie pary wodnej na brzegu zewnętrznym dla różnych wyrobów oraz efektywnej porowatości  $\varepsilon = 0,8$

Lp.	Rodzaj wyrobu	Grubość, $10^{-3}m$	Współ. przew. pary wodnej, $W \cdot m^{-2} \cdot Pa^{-1}$	Stężenie pary wodnej, $kg \cdot m^{-3}$
1	UTP-6 tkanina zewnętrzna	0,42	0,124	0,0498
2	UTP-6 membrana	0,72	0,152	0,0497
3	UTP-6 podszewka	2,34	0,060	0,0477
4	UTP-7 Phoenix tkanina zewnętrzna	0,42	0,124	0,0498
5	UTP-7 Phoenix membrana	0,54	0,067	0,0495
6	UTP-7 Phoenix podszewka	2,34	0,060	0,0477
7	UTP-9 Gold tkanina zewnętrzna	0,44	0,084	0,0497
8	UTP-9 Gold membrana	1,74	0,041	0,0475
9	UTP-9 Gold podszewka	2,26	0,063	0,0479
10	UTP-6 układ trójwarstwowy	3,48	0,027	0,0415
11	UTP-7 Phoenix układ trójwarstwowy	3,30	0,024	0,0407
12	UTP-9 Gold układ trójwarstwowy	4,44	0,022	0,0348

Tabela 27. Stężenie pary wodnej na brzegu zewnętrznym dla różnych wyrobów oraz efektywnej porowatości  $\varepsilon = 0,9$

Lp.	Rodzaj wyrobu	Grubość, $10^{-3}m$	Współ. przew. pary wodnej, $W \cdot m^{-2} \cdot Pa^{-1}$	Stężenie pary wodnej, $kg \cdot m^{-3}$
1	UTP-6 tkanina zewnętrzna	0,42	0,124	0,0498
2	UTP-6 membrana	0,72	0,152	0,0498
3	UTP-6 podszewka	2,34	0,060	0,0479
4	UTP-7 Phoenix tkanina zewnętrzna	0,42	0,124	0,0498
5	UTP-7 Phoenix membrana	0,54	0,067	0,0496
6	UTP-7 Phoenix podszewka	2,34	0,060	0,0479
7	UTP-9 Gold tkanina zewnętrzna	0,44	0,084	0,0497
8	UTP-9 Gold membrana	1,74	0,041	0,0478
9	UTP-9 Gold podszewka	2,26	0,063	0,0481
10	UTP-6 układ trójwarstwowy	3,48	0,027	0,0426
11	UTP-7 Phoenix układ trójwarstwowy	3,30	0,024	0,0419
12	UTP-9 Gold układ trójwarstwowy	4,44	0,022	0,0370

Zestawienie uzyskanych w ten sposób wyników wrażliwości stężenia pary wodnej na brzegu otwartym do otoczenia na porowatość przedstawiono na rysunku 41.



Rys. 41. Wrażliwość stężenia pary wodnej na brzegu otwartym do otoczenia na porowatość kompozytu

Źródło: opracowanie własne.

Uzyskane różnice są największe dla trzech ostatnich rodzajów wyrobów o numerach 10-12. Mają one największą grubość, a jednocześnie największy opór pary wodnej, czyli najmniejszy współczynnik przewodzenia pary wodnej. Maksymalna różnica jest znaczna i wynosi 16,4%. Oznacza to, że stężenie pary wodnej w tych wyrobach jest wrażliwe na efektywną porowatość wyrobu. Dla pozostałych materiałów różnice są nieznaczne, w tych przypadkach stężenie pary wodnej nie jest wrażliwe na porowatość.

Jako kolejna została zbadana wrażliwość stężenia wilgoci na brzegu swobodnym na współczynnik konwekcji. Podobnie jak poprzednio założono stężenie pary wodnej na płycie  $w_f^0 = 0,05 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , stężenie pary wodnej w otoczeniu  $w_{f\infty} = 0,005 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , porowatość materiału  $\varepsilon = 0,7$ . Zmienny jest teraz współczynnik konwekcji pary wodnej do otoczenia. Wartości stężenia pary wodnej uzyskane dla współczynnika  $h_w = 0,0012 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  zostały pokazane w tabeli 28,  $h_w = 0,0011 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  w tabeli 29,  $h_w = 0,001 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  w tabeli 30.

Tabela 28. Stężenie pary wodnej na brzegu zewnętrznym dla różnych wyrobów oraz współczynnika konwekcji  $h_w = 0,0012 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Lp.	Rodzaj wyrobu	Grubość, $10^{-3}\text{m}$	Współ. przew. pary wodnej, $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{Pa}^{-1}$	Stężenie pary wodnej, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
1	UTP-6 tkanina zewnętrzna	0,42	0,124	0,0497
2	UTP-6 membrana	0,72	0,152	0,0496
3	UTP-6 podszywka	2,34	0,060	0,0468
4	UTP-7 Phoenix tkanina zewnętrzna	0,42	0,124	0,0497
5	UTP-7 Phoenix membrana	0,54	0,067	0,0494
6	UTP-7 Phoenix podszywka	2,34	0,060	0,0468

7	UTP-9 Gold tkanina zewnętrzna	0,44	0,084	0,0496
8	UTP-9 Gold membrana	1,74	0,041	0,0465
9	UTP-9 Gold podszywka	2,26	0,063	0,0470
10	UTP-6 układ trójwarstwowy	3,48	0,027	0,0374
11	UTP-7 Phoenix układ trójwarstwowy	3,30	0,024	0,0361
12	UTP-9 Gold układ trójwarstwowy	4,44	0,022	0,0262

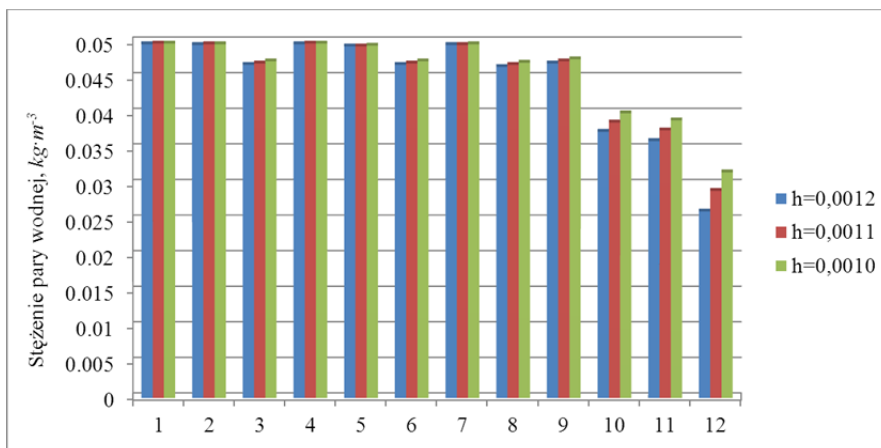
Tabela 29. Stężenie pary wodnej na brzegu zewnętrznym dla różnych wyrobów oraz współczynnika konwekcji  $h_w = 0,0011 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Lp.	Rodzaj wyrobu	Grubość, $10^{-3}m$	Współ. przew. pary wodnej, $W\cdot m^{-2}\cdot Pa^{-1}$	Stężenie pary wodnej, $kg\cdot m^{-3}$
1	UTP-6 tkanina zewnętrzna	0,42	0,124	0,0498
2	UTP-6 membrana	0,72	0,152	0,0497
3	UTP-6 podszywka	2,34	0,060	0,0470
4	UTP-7 Phoenix tkanina zewnętrzna	0,42	0,124	0,0498
5	UTP-7 Phoenix membrana	0,54	0,067	0,0494
6	UTP-7 Phoenix podszywka	2,34	0,060	0,0470
7	UTP-9 Gold tkanina zewnętrzna	0,44	0,084	0,0496
8	UTP-9 Gold membrana	1,74	0,041	0,0468
9	UTP-9 Gold podszywka	2,26	0,063	0,0473
10	UTP-6 układ trójwarstwowy	3,48	0,027	0,0387
11	UTP-7 Phoenix układ trójwarstwowy	3,30	0,024	0,0376
12	UTP-9 Gold układ trójwarstwowy	4,44	0,022	0,0291

Tabela 30. Stężenie pary wodnej na brzegu zewnętrznym dla różnych wyrobów oraz współczynnika konwekcji  $h_w = 0,001 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Lp.	Rodzaj wyrobu	Grubość, $10^{-3}m$	Współ. przew. pary wodnej, $W\cdot m^{-2}\cdot Pa^{-1}$	Stężenie pary wodnej, $kg\cdot m^{-3}$
1	UTP-6 tkanina zewnętrzna	0,42	0,124	0,0498
2	UTP-6 membrana	0,72	0,152	0,0497
3	UTP-6 podszywka	2,34	0,060	0,0473
4	UTP-7 Phoenix tkanina zewnętrzna	0,42	0,124	0,0498
5	UTP-7 Phoenix membrana	0,54	0,067	0,0495
6	UTP-7 Phoenix podszywka	2,34	0,060	0,0473
7	UTP-9 Gold tkanina zewnętrzna	0,44	0,084	0,0497
8	UTP-9 Gold membrana	1,74	0,041	0,0471
9	UTP-9 Gold podszywka	2,26	0,063	0,0476
10	UTP-6 układ trójwarstwowy	3,48	0,027	0,0400
11	UTP-7 Phoenix układ trójwarstwowy	3,30	0,024	0,0390
12	UTP-9 Gold układ trójwarstwowy	4,44	0,022	0,0317

Wyniki stężenia pary wodnej przedstawione w tabelach 26-28 zostały także zestawione na rysunku 42.



Rys. 42. Wrażliwość stężenia pary wodnej na brzegu otwartym do otoczenia na współczynnik konwekcji

Źródło: opracowanie własne.

Uzyskane wyniki są bardzo zróżnicowane. Stężenia pary wodnej dla niektórych wyrobów są niezależne od współczynnika konwekcji, patrz materiały o numerach: 1, 2, 4, 5, 7. Mają one stosunkowo nieznaczne grubości i stosunkowo duży współczynnik przewodzenia pary wodnej (czyli mały opór przewodzenia). Pozostałe materiały są charakteryzowane przez znaczne różnice stężeń wilgoci. Maksymalne różnice występują dla wyrobu o numerze 12, który ma największą grubość ze wszystkich oraz największy opór przewodzenia pary wodnej, czyli najmniejszy ze wszystkich współczynnik przewodzenia wilgoci. Wynosi on w tym przypadku aż 21,5%, co świadczy o dużej wrażliwości na ten parametr.

### 1.11.7. Wnioski odnoszące się do symulacji transportu strumienia ciepła i masy przez materiały przeznaczone na odzież strażacką

W rozdziale został rozważony problem przewodzenia ciepła i masy, jak również określone zależności teoretyczne zawierające zmienne stanu w postaci uwikłanej. Bazując na bilansach ciepła i masy, można określić równania transportu, które są matematycznie równaniami różniczkowymi drugiego rzędu z uwagi na zmienną/zmienne przestrzenne i pierwszego rzędu z uwagi na czas. Ich rozwiązanie jest możliwe wyłącznie przy sformułowaniu układu warunków brzegowych i początkowych. Jako prostą aplikację uzyskanych zależności rozwiązano problem ustalony przewodzenia ciepła w wyrobach włókienniczych o określonej budowie, wymiarach i charakterystykach przewodzenia ciepła i pary wodnej.

Uzyskane wyniki potwierdzają, że jest możliwe skuteczne modelowanie przewodzenia ciepła i masy wewnątrz wyrobów. Zaproponowana metoda sformułowania i rozwiązania równań transportu z warunkami brzegowymi bazuje na zjawiskach fizycznych zachodzących w materiale. Uzyskane zależności są skomplikowane matematycznie i stosunkowo trudne do rozwiązania dla proble-



mów nieustalonych, czyli zmiennych w czasie. Należy wówczas wprowadzić przybliżone rozwiązania numeryczne, połączone z programowaniem w określonych środowiskach. Dla problemów ustalonych o stałych charakterystykach czasowych rozwiązania są prostsze, jednak wymagają specjalistycznych narzędzi z uwagi na złożone warunki podczas przewodzenia ciepła. Warunki brzegowe dla ciepła na brzegu swobodnym to kombinowany warunek konwekcji do otoczenia oraz promieniowania, co wyklucza proste rozwiązanie analityczne.

Inna niedogodność tej metody to konieczność homogenizacji wyrobu. Może to być homogenizacja całkowita (czyli wszystkich warstw wyrobu dla stworzenia jednej homogenicznej warstwy) bądź częściowa (każda z warstw homogenizowana osobno). Z założenia wyklucza to rozkład zmiennych stanu, czyli temperatury i stężenia pary wodnej, w poszczególnych włóknach wewnątrz wyrobu lub wewnątrz jego poszczególnych warstw. Jest to więc metoda efektywna w skali makro, czyli poszczególnej warstwy materiału, zaś mało efektywna w skali mikro, czyli pojedynczych włókien. Dla ustalenia rozkładu pól stanu w pojedynczych włóknach należy zbudować model układu w skali mikro, w zakresie pojedynczych splotów lub kontaktu nitek i dopiero wtedy rozwiązywać równania w poszczególnych obszarach.

Niewątpliwa zaleta rozwiązania równań transportu to możliwość znalezienia rozkładów obu zmiennych stanu podczas transportu masy i ciepła, czyli temperatury i stężenia pary wodnej. Nie wszystkie środowiska posiadają taką możliwość, często ograniczając się do możliwości określenia wyłącznie temperatury. W przypadku innych programów znacznie zawęża to skalę problemu, poszukiwania rozwiązań i możliwych interpretacji zjawisk zachodzących w wyrobie włókienniczym podczas sprzężonego transportu.

Większość danych wykorzystanych podczas symulacji numerycznych została ściśle określona w przypadku transportu ciepła i dokładnie zacytowana z wcześniejszych zestawień w tej pracy. Dlatego określenie wrażliwości mogło w tym przypadku dotyczyć tylko dwóch parametrów: efektywnej porowatości kompozytu oraz współczynnika konwekcji ciepła. Pole temperatury dla badanych wyrobów włókienniczych jest znacznie bardziej wrażliwe na zmianę współczynnika konwekcji niż porowatość. Dane dla transportu pary wodnej nie zostały zacytowane, ale przyjęte jako najbardziej prawdopodobne, ponieważ taki przypadek nie był wcześniej rozważany podczas symulacji innymi metodami. Z uwagi na kompatybilność z poprzednimi rozwiązaniami, wrażliwość pól stanu została wyznaczona dla analogicznych parametrów, jak w przypadku ciepła, takich jak: efektywna porowatość wyrobu oraz współczynnik konwekcji pary wodnej. Z uwagi na inne charakterystyki przewodzenia pary wodnej niż ciepła, pole wilgoci jest praktycznie niewrażliwe na porowatość, wykazuje natomiast dość znaczną wrażliwość na współczynnik konwekcji pary wodnej.

Podsumowując można stwierdzić, że zaproponowana metoda rozwiązywania równań transportu z wykorzystaniem warunków brzegowych może być skutecznym i efektywnym narzędziem określania pól zmiennych stanu (temperatury i stężenia pary wodnej) w wyrobach włókienniczych rozważanych w skali makro.

## 2. WYBRANE ZAGADNIENIA Z METROLOGII UŻYTKOWEJ ODZIEŻY DLA WCZEŚNIAKÓW

### 2.1. Wstęp

Kolejną grupą odbiorców odzieży specjalnego przeznaczenia charakteryzującej się zdefiniowanymi właściwościami biofizycznymi są dzieci przedwcześnie urodzone. Są to dzieci urodzone przed końcem 37 tygodnia ciąży z masą ciała między 501 a 2501 g. W opracowaniu [71] przedstawiono klasyfikację stopnia wcześniactwa ze względu na poród w określonym tygodniu ciąży, zgodnie z tabelą 31.

Tabela 31. Klasyfikacja stopnia wcześniactwa wg [71]

Stopień wcześniactwa	Okres trwania ciąży
Poród skrajnie przedwczesny < 28 tygodni	< 28 tygodni
Poród bardzo przedwczesny tygodnia	28-31 tygodni
Poród umiarkowanie przedwczesny	32-33 tygodni
Poród miernie przedwczesny	34-36 tygodni

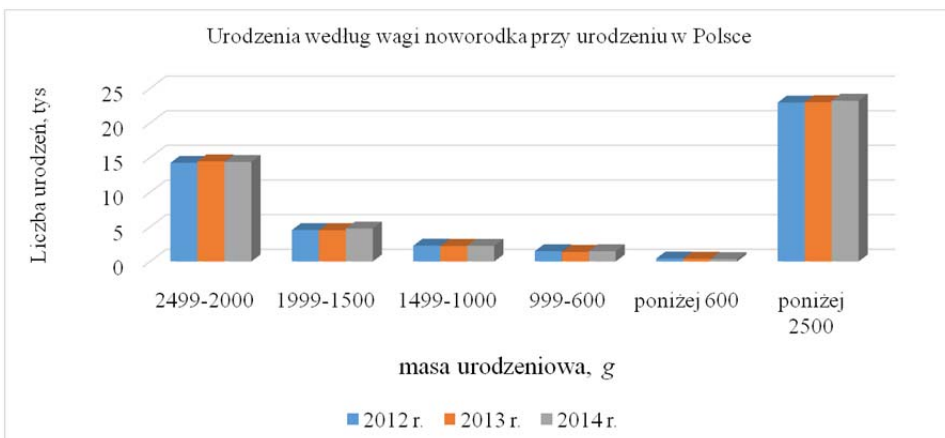
Według klasyfikacji WHO rozróżniamy noworodki o następującej masie ciała [72]: mała masa ciała 1500-2499 g, bardzo mała masa ciała 1000-1499 g, skrajnie mała masa ciała 500-999 g.

W Polsce co roku rodzi się ponad 300 000 dzieci. W 2011 roku w Polsce urodziło się 28 035 wcześniaków, co stanowi ok. 7% wszystkich nowo narodzonych dzieci. Pięć i pół procent dzieci urodzonych w ciągu roku w Polsce to dzieci z masą urodzeniową poniżej 2500 g. Ze skrajnie niską masą urodzeniową – poniżej 1000 g rodzi się 0,46% dzieci.

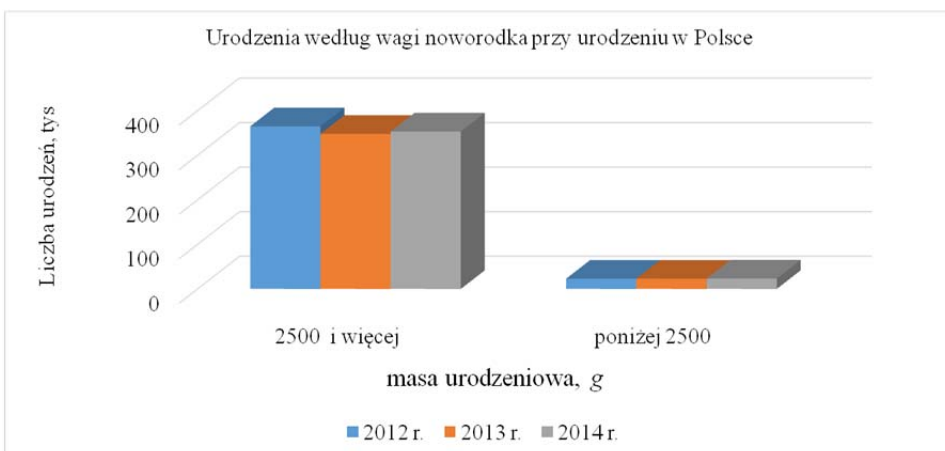
Śmiertelność okołoporodowa dla dzieci z masą urodzeniową poniżej 1000 g wynosi 47,7%, zaś współczynnik ten zmniejsza się wraz ze wzrostem masy urodzeniowej dzieci. Jest to zasługa 3-poziomowego systemu hospitalizacji, który został wprowadzony w Polsce w roku 1995, dzięki któremu porody dzieci z najniższą masą urodzeniową odbywają się przede wszystkim w szpitalach o drugim i trzecim stopniu referencyjności [73-76]. Główne dane statystyczne odnoszące się do przedwczesnych urodzeń dzieci w Polsce przedstawiono w tabeli 32 i zilustrowano na rysunkach 43-44 zgodnie z danymi GUS [74].

Tabela 32. Urodzenia według wagi noworodka przy urodzeniu w podziale na województwa w latach 2012-2014 wg [74]

WOJEWÓDZTWO POWIAT	Ogółem	Waga noworodka 2012r													
		5000g i więcej	4999- 4500	4499- 4000	3999- 3500	3499- 3000	2999- 2500	2500 g i więcej	2499- 2000	1999- 1500	1499- 1000	999-600	poniżej 600 g	poniżej 25000 a	nieustalona
POLSKA	387858	517	5108	36096	120477	144951	57762	364911	14235	4532	2278	1476	422	22943	4
DOLNOŚLĄSKIE	27353	30	349	2359	8161	10489	4282	25670	1051	321	163	108	40	1683	-
KUJAWSKO-POMORSKIE	20857	35	355	2151	6691	7326	3042	19600	781	254	141	72	9	1257	-
LUBELSKIE	21297	29	264	1967	6600	8054	3032	19946	801	287	150	92	21	1351	-
LUBUSKIE	10421	12	136	933	3145	3817	1677	9720	425	144	63	56	12	700	1
ŁÓDZKIE	23951	33	280	2131	7228	8960	3778	22410	946	314	157	99	25	1541	-
MAŁOPOLSKIE	35275	28	347	2679	10607	13788	5764	33213	1311	389	189	132	41	2062	-
MAZOWIECKIE	57493	79	870	5906	18583	20975	7885	54298	1907	676	345	200	65	3193	2
OPOLSKIE	8976	13	113	775	2790	3336	1423	8450	335	85	53	45	8	526	-
PODKARPACKIE	21143	29	253	1778	6452	8333	3141	19986	709	218	129	68	33	1157	-
PODLASKIE	11199	25	195	1262	3689	3961	1460	10592	356	127	70	49	5	607	-
POMORSKIE	25148	55	441	2929	8366	8840	3195	23826	779	286	146	89	22	1322	-
ŚLĄSKIE	44759	45	416	3287	12794	17639	7611	41792	1917	575	248	180	46	2966	1
ŚWIĘTOKRZYSKIE	11562	10	131	1056	3603	4362	1660	10822	475	140	76	38	11	740	-
WARMIŃSKO-MAZURSKIE	14400	19	221	1492	4613	5118	2037	13500	561	185	90	55	9	900	-
WIELKOPOLSKIE	37981	58	546	3945	12387	13850	5208	35994	1288	358	170	121	50	1987	-
ZACHODNIOPOMORSKIE	16043	17	191	1446	4768	6103	2567	15092	593	173	88	72	25	951	-
Waga noworodka 2013r															
POLSKA	370962	433	4686	34067	113393	139486	55899	347964	14460	4512	2244	1385	392	22993	5
DOLNOŚLĄSKIE	25914	20	305	2180	7671	9884	4166	24226	1059	339	163	102	25	1688	-
KUJAWSKO-POMORSKIE	19926	31	333	2125	6356	7080	2821	18746	731	232	121	77	19	1180	-
LUBELSKIE	19810	26	255	1834	6187	7394	2830	18526	835	242	109	82	16	1284	-
LUBUSKIE	9780	15	114	825	2898	3702	1584	9138	387	121	65	58	10	641	1
ŁÓDZKIE	22501	20	228	1871	6573	8632	3596	20920	986	307	167	92	29	1581	-
MAŁOPOLSKIE	34406	28	287	2600	9948	13605	5809	32277	1368	421	206	104	29	2128	1
MAZOWIECKIE	55611	67	779	5593	17893	20328	7704	52364	2011	626	338	184	85	3244	3
OPOLSKIE	8271	7	115	755	2600	3078	1235	7790	312	86	42	32	9	481	-
PODKARPACKIE	20445	24	241	1701	6135	8050	3099	19250	754	231	107	79	24	1195	-
PODLASKIE	10650	16	183	1198	3509	3861	1328	10095	330	116	61	43	5	555	-
POMORSKIE	24052	38	431	2842	7780	8460	3115	22666	825	280	138	118	25	1386	-
ŚLĄSKIE	42993	34	414	3187	12011	16859	7523	40028	1948	538	276	149	54	2965	-
ŚWIĘTOKRZYSKIE	10744	9	114	974	3226	4077	1674	10074	424	148	56	32	10	670	-
WARMIŃSKO-MAZURSKIE	13670	20	181	1424	4240	4961	1976	12802	539	175	82	63	9	868	-
WIELKOPOLSKIE	36715	64	536	3646	11867	13518	5056	34687	1278	413	204	109	24	2028	-
ZACHODNIOPOMORSKIE	15474	14	170	1312	4499	5997	2383	14375	673	237	109	61	19	1099	-
Waga noworodka 2014r															
POLSKA	376501	472	4606	34113	116452	141566	56076	353285	14373	4746	2262	1484	342	23207	9
DOLNOŚLĄSKIE	27268	31	294	2215	8266	10406	4290	25502	1098	367	161	117	22	1765	1
KUJAWSKO-POMORSKIE	20100	35	337	2085	6421	7204	2825	18907	725	237	130	79	22	1193	-
LUBELSKIE	19885	26	228	1764	6229	7434	2865	18546	818	296	127	74	22	1337	2
LUBUSKIE	9750	11	117	839	2813	3777	1564	9121	399	135	59	33	3	629	-
ŁÓDZKIE	22776	25	260	1925	7023	8476	3496	21205	975	332	145	100	19	1571	-
MAŁOPOLSKIE	34528	27	296	2566	10039	13933	5578	32439	1320	424	193	127	25	2089	-
MAZOWIECKIE	57341	77	756	5718	18588	21112	7872	54123	1943	661	347	216	48	3215	3
OPOLSKIE	8629	8	98	785	2689	3199	1343	8122	316	105	57	22	7	507	-
PODKARPACKIE	20027	23	201	1712	6064	7722	3093	18815	727	255	122	84	24	1212	-
PODLASKIE	11077	23	193	1225	3728	3941	1380	10490	347	124	56	49	11	587	-
POMORSKIE	24716	46	454	2800	8098	8748	3185	23331	816	297	155	95	20	1383	2
ŚLĄSKIE	42905	45	346	3142	12067	16872	7482	39954	1853	566	287	198	46	2950	1
ŚWIĘTOKRZYSKIE	10789	7	96	888	3257	4212	1615	10075	483	129	57	38	7	714	-
WARMIŃSKO-MAZURSKIE	14006	16	202	1360	4500	5035	2034	13147	521	185	74	66	13	859	-
WIELKOPOLSKIE	37123	54	541	3785	12088	13589	5015	35072	1295	412	191	119	34	2051	-
ZACHODNIOPOMORSKIE	15581	18	187	1304	4582	5906	2439	14436	737	221	101	67	19	1145	-



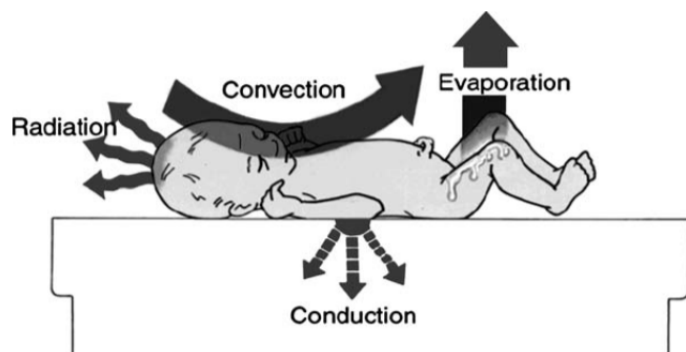
Rys. 43. Urodzenia według wagi noworodka przy urodzeniu w latach 2012-2014  
 Źródło: opracowanie własne wg danych GUS.



Rys. 44. Urodzenia według wagi noworodka przy urodzeniu w latach 2012-2014  
 Źródło: opracowanie własne wg danych GUS.

Niestety, umieralność dzieci przedwcześnie urodzonych w naszym kraju jest wyższa niż w innych krajach Europy Zachodniej [77-79]. Według bazy danych EUROSTAT-u na obszarze obecnych krajów członkowskich Unii Europejskiej wskaźnik ten spada systematycznie od około 6,8‰ w roku 1997 do 4,7‰ w roku 2007 [77]. Jak wynika z danych przedstawionych przez dr Katarzynę Szamotulską z Zakładu Epidemiologii Instytutu Matki i Dziecka w Warszawie, umieralność niemowląt obniża się w Polsce nieprzerwanie od lat 90. XX wieku, w 1999 roku wyniosła 8,9‰, w roku 2008 osiągnęła wartość 6‰, a w roku 2012 spadła do wartości 4,6‰ (co stanowi około 5 zgonów na 1000 urodzeń) [78-80].

Zgodnie z danymi bazy EUROSTAT-u, umieralność okołoporodowa, określana jako liczba urodzeń martwych płodów powyżej 1000 g masy ciała oraz zgonów przed upływem 6 dni po porodzie, na 1000 urodzeń żywych, w krajach europejskich wahała się od 18,3‰ (Macedonia) do 5,4‰ (Szwecja) w roku 1997, zaś w roku 2006 od 15,2‰ (Macedonia) do 3,3‰ (Luksemburg). Polska w tym zestawieniu znajdowała się na środkowej pozycji. Wskaźnik umieralności okołoporodowej oscylował między 10,8‰ w roku 1999, a 6,8‰ w 2006 roku [77]. Głównymi przyczynami umieralności niemowląt są wady rozwojowe oraz stany chorobowe, głównie infekcje powstałe w okresie okołoporodowym (ok. 82% przyczyn zgonów noworodków w UE) [77]. Przedwczesne porody spowodowane są m.in. przez: zanieczyszczenie środowiska, niską świadomość przyszłych matek, biedę, a także uwarunkowania genetyczne. Przedterminowe porody są bardzo niebezpieczne dla niemowląt ze względu na niedojrzałość narządów i tkanek dziecka. Decydujące o życiu wcześniaka są pierwsze godziny po porodzie. Wcześniak z niską masą urodzeniową ma dużą powierzchnię ciała w stosunku do masy, co jest przyczyną szybkiej utraty ciepła i wody. Ustalono, że u wcześniaków z niską masą urodzeniową, w pierwszych 24 godzinach życia, utrata wody jest na poziomie 150 ml/kg masy ciała, co może przyczyniać się do zaburzeń gospodarki elektrolitów. Dla porównania, u dzieci urodzonych już po 30 tygodniu ciąży utrata wody jest na poziomie 12 ml·kg<sup>-1</sup>·dzień<sup>-1</sup> [81]. Dla prawidłowego rozwoju wcześniaka istotne jest zapewnienie stabilnej temperatury i wilgotności mikrośrodowiska. Utrzymywanie termicznie neutralnego środowiska w bardzo wąskich granicach temperatury – od 36,5°C do 37,5°C minimalizuje zużywanie tlenu i konsumpcję kalorii przez organizm, co przyczynia się do rozwoju masy ciała [82]. Utrzymywanie stałej temperatury jest konieczne także do zachowania bilansu cieplnego. Przedwześnie urodzone dzieci mają upośledzony metabolizm, co utrudnia utrzymanie stałej ciepłoty ciała. Tkanka podskórna u wcześniaków jest zbudowana z małych komórek tłuszczowych, tworzących tkankę tłuszczową białą i brązową. Pierwsza z nich pełni funkcje izolacyjne i stanowi źródło energii, druga zaś odgrywa istotną rolę w procesach termoregulacji. Tkanka tłuszczowa u wcześniaków urodzonych w 24 tygodniu ciąży stanowi poniżej 1% masy urodzeniowej, podczas gdy u dziecka urodzonego w przewidywanym okresie ciąży (40 tygodniu) stanowi ponad 11% [83]. W efekcie, utrata ciepła u noworodków przedwześnie urodzonych jest bardziej intensywna niż u dzieci urodzonych terminowo. W prawidłowo funkcjonującym organizmie człowieka bilans cieplny jest równy zero. Wymiana ciepła pomiędzy organizmem a otoczeniem następuje w wyniku parowania, konwekcji, promieniowania i przewodzenia (rysunek 45) [84], przy czym odparowanie potu z powierzchni skóry zawsze wiąże się z utratą ciepła, zaś konwekcja, promieniowanie i przewodzenie mogą sprzyjać zarówno utracie ciepła, jak i jego pozyskiwaniu.



Rys. 45. Sposoby przekazywania ciepła przez ciało noworodka  
Źródło: wg [84].

Skóra jest podstawową barierą pomiędzy ciałem a środowiskiem. Niedojrzałość skóry wcześniaków w bezpośredni sposób wpływa na utratę ciepła i obniżenie wilgotności ciała. U wcześniaków urodzonych długo przed terminem skóra jest cienka, przezroczysta, o konsystencji galaretowatej i czerwonej barwie. Nie ma warstwy rogowej, a jej grubość jest rzędu do  $27,4 \mu\text{m}$  [85]. Brak warstwy rogowej powoduje istotnie zwiększoną utratę wilgotności przez skórę. Aby zapobiec nadmiernemu wychłodzeniu i utracie wilgotności, zaraz po urodzeniu stosuje się czasowe umieszczenie dziecka w worku polietylenowym. Jest kilka opracowań, które potwierdzają redukcję utraty wilgotności i temperatury ciała dzięki wytwarzającemu się mikroklimatowi wokół ciała wcześniaka [86]. Jednak zachodzące w mikroklimacie zmiany temperatury nie zostały do tej pory dobrze zbadane. Z powodu braku szczegółowej wiedzy na ten temat istnieje poważne ryzyko powstania hipotermii lub hipertermii. Zarówno hipo-, jak i hipertermia są bardzo niebezpieczne dla dziecka, mogą powodować bardzo poważne uszkodzenia organizmu [86]. Inne sposoby stosowane w oddziałach neonatologicznych, które mają na celu zabezpieczenie ciała dziecka przed utratą wilgotności, to stosowanie kremów, maści lub bioopatrunków okluzyjnych [82]. Najbardziej pomocne są inkubatory, w których można regulować wilgotność i temperaturę. Wyniki badań udowodniły jednak, że nawet w inkubatorach, które mają specjalne filtry, nie da się uniknąć tworzenia się patogenów, takich jak *pseudomonas* [81]. Dodatkowo stwierdzono, że utrzymywanie wilgotności w inkubatorze nie daje skórze sygnałów do produkowania bariery ochronnej, co w konsekwencji opóźnia proces dojrzewania skóry wcześniaka [81]. Inkubatory, promienniki ciepła czy też podgrzewane łóżeczka zabezpieczają niemowlęta przed niebezpieczeństwami związanymi z gwałtowną zmianą temperatury, czy wilgotności, jednak powstaje poważny problem, kiedy trzeba wyjąć dziecko z inkubatora lub spod promiennika w celu przeprowadzenia pilnych zabiegów medycznych. Dochodzi wówczas do gwałtownej zmiany temperatury otoczenia, dlatego też nawet tak małe dzieci powinny być ubrane celem zapewnienia zrównoważonego bilansu ciepłota organizmu dziecka.

## 2.2. Omówienie rozwiązań surowcowych i konstrukcyjnych odzieży dla niemowląt przedwcześnie urodzonych

Tradycyjna odzież niemowlęca dostępna na rynku nie spełnia wymagań koniecznych dla dzieci przedwcześnie urodzonych. Delikatna i cienka skóra wcześniaka jest bardzo podatna na podrażnienia i uszkodzenia, dlatego też odzież dla wcześniaków wykonuje się głównie z włókien naturalnych, np. bawełny. Z jednej strony musi ona zapewniać dziecku ciepło, z drugiej zaś powinna być lekka i przewiewna. Wszelkie zatrzaski i metki powinny znajdować się na zewnętrznej stronie ubrania, tak aby nie podrażniały skóry dziecka [87].

W Polsce jedynym producentem odzieży dla wcześniaków jest firma Gattino [88]. Firma ta stworzyła kolekcję PreMature, która ma spełniać oczekiwania rodziców, lekarzy neonatologów i rehabilitantów, a przede wszystkim zapewnić komfort dla bardzo wrażliwej skóry wcześniaka [88]. Kolekcja została stworzona w oparciu o opinie i doświadczenia z USA, Irlandii, Wielkiej Brytanii i Australii, gdzie opieka nad wcześniakami jest obecnie na bardzo wysokim poziomie, a dostępność odzieży dla najmłodszych i najmniejszych dzieci nie stanowi problemu [88]. Odzież wykonana jest z materiałów, które posiadają certyfikaty o nazwach:

- Bezpieczne dla niemowląt,
- Bezpieczne dla dziecka,
- Przyjazne dla człowieka,
- OEKO-Tex – tekstylia godne zaufania [88].

Większość firm oferujących odzież dla dzieci przedwcześnie urodzonych znajduje się w Wielkiej Brytanii. Deklarują one na swoich stronach internetowych, że ich ubrania wykonane są w 100% z delikatnej bawełny, są też takie, które oferują ubrania wykonane z bawełny organicznej i posiadają certyfikat GOTS (Global Organic Textile Standard). Najmniejsze rozmiary ubrań oferowanych przez producentów to wymiar długościowy – 38 cm [89-95]. Odzież firmy PREM 2 PRAM, wykonana w 100% z delikatnej bawełny, została specjalnie zaprojektowana dla wcześniaków. Boczne i przednie otwory umożliwiają personelowi medycznemu szybki, łatwy i nieinwazyjny sposób rozbierania i ubierania dziecka, jak pokazano na poniższych fotografiach [89].



Rys. 46. Ubranka firmy PREM 2 PRAM, przeznaczone dla niemowląt przedwcześnie urodzonych

Źródło: wg [89].

Inna firma Chuckleberries, specjalizująca się w produkcji odzieży dla wcześniaków, zaproponowała ubrania zapinane na rzepy i zatrzaski niklowane. Ubrania te również wykonano ze 100% delikatnej bawełny [94]. Podobnie jak ubrania innych firm specjalizujących się w odzieży dla wcześniaków, odzież ta pozwala na ubieranie i rozbieranie dziecka w sposób szybki i łatwy, dzięki możliwości ich rozłożenia na płasko.



Rys. 47. Ubrania firmy Chuckleberries, przeznaczone dla niemowląt przedwcześnie urodzonych

Źródło: [94].

Firma Mothercare Premature zaprojektowała odzież wspólnie z neonatologami. Ubrania tej firmy również wykonane są w 100% z delikatnej bawełny. Wszystkie materiały i dodatki używane do wytwarzania tej odzieży pochodzą od dostawców posiadających odpowiednie certyfikaty [95].



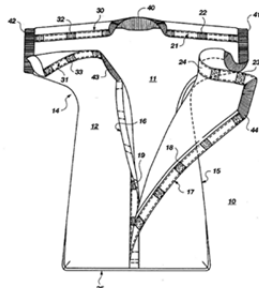
Rys. 48. Ubrania firmy Mothercare Premature, przeznaczone dla niemowląt przedwcześnie urodzonych

Źródło: [95].

Ubranka te są wykonane w taki sposób, aby umożliwiły łatwy dostęp do wszystkich części ciała dziecka bez konieczności odłączania go od aparatury medycznej. Ubiór ten jest odpowiedni do stosowania w specjalnych jednostkach Baby Care (SCBU) lub na oddziale noworodków, gdzie dziecko może znajdować się w inkubatorze. Ubranie zostało wykonane z jednego kawałka materiału, bez szwów. Jest ono wygodne w noszeniu i łatwe w konserwacji. Działania



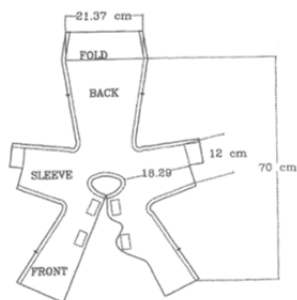
wykonana jest splotem interlokowym, który zapewnia odzieży lepszą rewersyjność odkształceń w procesach konserwacji i użytkowania [95]. Wiele konstrukcji ubrań dla wcześniaków bazuje na patencie amerykańskim, w którym przedstawiono projekt rozpinanego śpiworka dla niemowląt (rysunek 49) [96].



Rys. 49. Schemat śpiworka dla wcześniaków

Źródło: wg [96].

W patencie tym została przedstawiona konstrukcja, umożliwiająca bezinwazyjne i łatwe opiekowanie się dzieckiem przedwcześnie urodzonym, którego nie można zbyt często wyjmować z inkubatora, a jednocześnie trzeba mieć dostęp do podłączania specjalistycznej aparatury, wspomagającej procesy życiowe. Z badań przeprowadzonych w klinice dermatologii Uniwersytetu w Bolonii wynika, że bawełna może powodować podrażnienia skóry niemowląt. Dzieje się tak dlatego, że w materiale bawełnianym mogą występować krótkie włókna, o długości od 1-3 cm, o płaskim i nieregularnym przekroju, które na skutek pochłaniania wilgoci mogą się rozprężyć i uwalniać się ze struktury materiału, wywołując działanie drażniące. Zaproponowano więc włókna jedwabiu, które ze względu na geometrycznie regularny kształt i monofilamentową budowę (pojedyncze włókna mogą mieć długość ponad 800 m) oraz gładkość powierzchni nie powodują podrażnień skóry. Budowa chemiczna włókna jedwabiu jest bardzo zbliżona do budowy chemicznej ludzkiego włosa (97% białka i tłuszczu oraz 3% woskowej substancji). Każda nitka wątku jedwabnego składa się z wielu włókien, które ze względu na swoją gładkość nie powodują tarcia o skórę. Dodatkowo jedwab pomaga utrzymać temperaturę ciała, redukując wilgoć, co może jednak doprowadzić do niepożądanego przesuszenia skóry. Odzież wykonana z włókien jedwabnych może posiadać także właściwości antybakteryjne oparte na związku amoniowego alkoksylanu czwartorzędowego [97]. W czasopiśmie *Clothing and Textiles Research Journal* naukowcy opisują ubranie dziecięce stosowane dla niemowląt urodzonych przed 27 tygodniem ciąży (rysunek 50), wykonane z poliestrowego trykotu o masie powierzchniowej  $220 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ . Dżianina ta była poddana specjalnej obróbce, aby uzyskać wyrób o podwyższonej miękkości. Autorzy twierdzą, że uzyskali wyrób o zadowalających właściwościach termoregulacyjnych. Zaproponowali w odzieży szwy zewnętrzne, aby nie podrażniać ciała dzieci [98].



Rys. 50. Schemat ubranka przeznaczonego dla niemowląt przedwcześnie urodzonych

Źródło: [98].

Niektóre materiały stosowane do wytwarzania odzieży dziecięcej mogą w znacznym stopniu pogarszać stan skóry, zwłaszcza u dzieci, które mają niewykształconą warstwę rogową. Na przykład poliamid może powodować alergiczne kontaktowe zapalenie skóry i pokrzywkę kontaktową, wełna może powodować ostre agranulocytowe zapalenie skóry [97]. Ubrania dla wcześniaków muszą spełniać wiele kryteriów. Odzież powinna być wykonana z surowców niepowodujących alergii lub podrażnień skóry i zapewniających komfort biofizyczny. Nie bez znaczenia dla wyjątkowo delikatnej skóry wcześniaka są zastosowane w ubrankach szwy – powinny być jak najbardziej delikatne i spłaszczone. Odzież nie powinna posiadać metek ani żadnych innych wszywek, które mogłyby podrażniać skórę. Wszelkie zapięcia, ułatwiające ubieranie i rozbieranie, powinny znajdować się z przodu lub z boku. Bardzo ważnym kryterium bezpieczeństwa ubranek jest brak sznurków, ponieważ istnieje możliwość zaplątania w nie przewodów aparatury medycznej, a nawet niekontrolowane skrępowania ciała dziecka. Ubrania nie mogą być zaopatrzone w metalowe elementy, np. napy, które pod wpływem promienników ciepła nagrzewają się i mogą doprowadzić do poparzenia dziecka. Kolejnym bardzo istotnym kryterium jest funkcjonalność, polegająca na łatwym dostępie do ciała dziecka bez konieczności zdejmowania ubrania w razie pilnych zabiegów medycznych lub też w przypadku wykonywania badań, czy podłączania aparatury medycznej. Ostatnim kryterium, może mniej ważnym w zakresie ochrony wcześniaka, ale bardzo istotnym dla rodziców, jest kryterium estetyki ubranek. Każdy rodzic chce, aby jego dziecko, mimo niewielkich rozmiarów, wyglądało atrakcyjnie, podobnie jak niemowlęta urodzone o czasie. Bardzo często właśnie to kryterium decyduje o zakupieniu konkretnego ubrania, a nie jego skład surowcowy oraz posiadane przez wyrób certyfikaty bezpieczeństwa.

## 2.3. Wymagania stawiane odzieży przez organizacje konsumenckie

### 2.3.1. Certyfikat OekoTex Standard 100 „Tekstylia godne zaufania zbadane na substancje szkodliwe według Oeko-Tex Standard 100”

Oeko-Tex<sup>®</sup> Standard 100 jest wiodącym znakiem bezpieczeństwa, prawnie chronionym, nadawanym przez członków Międzynarodowego Stowarzyszenia na Rzecz Badań i Rozwoju Ekologii Wyrobów Włókienniczych Oeko-Tex [99]. W Polsce ośrodkiem mającym prawo wydawania certyfikatów Oeko-Tex jest Instytut Włókiennictwa w Łodzi. Certyfikat Oeko-Tex<sup>®</sup> Standard 100 potwierdza spełnienie wymagań zawartych w załączniku XVII REACH [100], amerykańskich wymagań odnośnie całkowitej zawartości ołowiu w artykułach dla dzieci CPSIA [101] oraz polskich przepisów prawnych dotyczących bezpieczeństwa produktów włókienniczych [102]. Podstawą do uzyskania znaku jest norma Oeko-Tex<sup>®</sup> Standard 100, zawierająca wymagania, jakie muszą spełniać surowce i wyroby włókiennicze (wartości graniczne i dopuszczalne stężenia substancji szkodliwych) oraz określa warunki uzyskiwania certyfikatu. Metody badawcze stosowane w procesie certyfikacji podane są w dokumencie Oeko-Tex<sup>®</sup> Standard 100 – Testing procedures [103]. Oeko-Tex<sup>®</sup> Standard 100 jest znakiem nadawanym wszelkiego rodzaju wyrobom włókienniczym, które podzielone są na cztery następujące klasy:

- wyroby dla dzieci do 3 lat,
- wyroby mające bezpośredni kontakt ze skórą,
- wyroby niemające bezpośredniego kontaktu ze skórą,
- artykuły wyposażenia wnętrz.

W różnych klasach mogą być certyfikowane i znakowane nie tylko gotowe do sprzedaży wyroby, ale także ich półprodukty we wszystkich stopniach obróbki (nici, przędze, tkaniny i akcesoria).

Znakiem Oeko-Tex Standard 100 mogą być oznakowane tekstylia, które m.in.:

- nie zawierają żadnych czynników rakotwórczych, żadnych barwników azoowych, które mogą odszczepiać aryloaminy z grupy MAK III A1 i III A2 oraz żadnych alergennych barwników zawieszinowych,
- zostały przebadane na obecność pestycydów i chlorofenoli, a ich zawartość nie przekracza dopuszczalnych wartości,
- zostały przebadane na ewentualną obecność wolnych metali ciężkich, a ich zawartość nie przekracza dopuszczalnych wartości,
- nie zawierają formaldehydu lub zawierają go poniżej wartości ustalonej w kryteriach,
- wartość *pH* odpowiada wartościom skóry człowieka,
- nie zawierają żadnych przenośników chloroorganicznych,

- nie zawierają żadnych wykończeń bioaktywnych ani środków uniepalniających (dotyczy produktów klas I do III) z wyłączeniem środków dopuszczonych przez Stowarzyszenie Oeko-Tex,
- zostały przebadane na obecność związków cynoorganicznych, a ich zawartość nie przekracza dopuszczalnych wartości,
- zostały przebadane na obecność policyklicznych związków aromatycznych (PAH), a ich zawartość nie przekracza dopuszczalnych wartości,
- zostały przebadane na obecność związków fluorowęglowych (PFOS, PFOA), a ich zawartość nie przekracza dopuszczalnych wartości,
- posiadają odpowiednie odporności wybarwień.

Znak Oeko-Tex® Standard 100 (rysunek 51) informuje, że oznakowany produkt spełnia wymagania zdefiniowane powyżej.



Rys. 51. Symbol certyfikatu Oeko-Tex® Standard 100

Źródło: [99].

### 2.3.2. Certyfikat Global Organic Textile Standard (GOTS)

Global Organic Textile Standard (GOTS) jest uznawany za wiodący standard przetwarzania wyrobów włókienniczych wykonanych z włókien organicznych na całym świecie [104]. Certyfikat powstał dzięki stowarzyszeniu International Working Group on Global Organic Textile Standard (IWG) (rysunek 52). Jest to grupa robocza skupiająca organizacje z Europy, USA i Japonii, zajmujące się certyfikowaniem i oznaczaniem produktów przyjaznych środowisku. Organizacja ta sformułowała bardzo rygorystyczne kryteria zarówno ekologiczne, jak i społeczne dla całego cyklu produkcji. Jedynie wyroby włókiennicze, zawierające minimum 70% włókien organicznych mogą być certyfikowane zgodnie z wytycznymi GOTS. Wszystkie wykorzystywane środki chemiczne, takie jak: barwniki i środki pomocnicze muszą spełniać określone kryteria środowiskowe i toksykologiczne, ponadto wybór akcesoriów również musi uwzględniać aspekty ekologiczne.



Rys. 52. Symbol certyfikatu GOTS

Źródło: [104].

Celem tego standardu jest określenie uznawanych na całym świecie wymagań, które zapewniają ekologiczny status wyrobom włókienniczym, od pierwszego etapu, jakim jest pozyskiwanie surowców, poprzez ekologiczną i społecznie odpowiedzialną produkcję aż do etykietowania. Wszystkie te działania mają zapewnić wiarygodność produktom nabywanym przez konsumenta finalnego. Wyróżniamy dwie kategorie oznaczenia GOTS:






- *organic* (ekologiczne) – takie oznaczenie GOTS przyznaje produktom, które składają się w co najmniej 95% z certyfikowanych włókien ekologicznych,
- *made with (x %) organic* (wyprodukowane z użyciem (x %) surowców ekologicznych) – produkt musi zawierać minimum 70% certyfikowanych włókien ekologicznych. W tym przypadku dopuszcza się maksymalnie 10% włókien syntetycznych. Do produkcji skarpetek, legginsów i odzieży sportowej można wykorzystać do 25% włókien syntetycznych.

Jeśli zastosowany surowiec pochodzi z pól w okresie przejściowym, które przez przynajmniej 12 miesięcy były zarządzane zgodnie z zasadami rolnictwa ekologicznego i pozostają pod kontrolą ciał certyfikujących, dopuszczalne są oznaczenia „organic in conversion” oraz „made with (x %) organic in conversion”. Standard GOTS dla tekstyliów pochodzenia ekologicznego obejmuje: produkcję, przetwórstwo, pakowanie, etykietowanie, eksport, import, dystrybucję wszystkich naturalnych włókien. Podstawowe obszary oceny zgodności ze standardem GOTS obejmują pochodzenie włókien i proces przetwórczy. Surowce powinny mieć charakter naturalny i pochodzić z upraw prowadzonych metodami ekologicznymi, w oparciu o wytyczne Rozporządzeń WE nr 834/2007 [105] oraz 889/2008 [106] i wytyczne USDA-NOP [107]. Dodatkowo produkty nie powinny zawierać materiałów wytworzonych przy wykorzystaniu metody GMO (Genetically Modified Organisms). Kryteria dla procesu produkcyjnego wyznaczone w Standardzie GOTS obejmują każdy etap procesu produkcji wyrobów włókienniczych (etap przedzenia, tkania, obróbki wykańczalniczej itp.) i dla każdego takiego etapu podane są wytyczne dotyczące stosowalności dozwolonych/niedozwolonych substancji wspomagających procesy przetwórcze, a jednocześnie zapewniających ochronę środowiska. Najważniejsze kryteria dla procesu produkcyjnego to:

- stosowanie w produkcji włókien ekologicznych,
- stosowanie nietoksycznych i biodegradowalnych substancji chemicznych (np. barwników, środków pomocniczych i substancji wspomagających),
- zakaz stosowania toksycznych metali ciężkich, formaldehydu, rozpuszczalników aromatycznych, funkcjonalnych nanocząsteczek, organizmów zmodyfikowanych genetycznie (GMO) oraz ich enzymów,
- ograniczenie stosowania syntetycznych środków klejących, wybielaczy z dodatkiem chloru, barwników azowych, zakaz stosowania PVC,
- certyfikowane podmioty muszą określić i stosować swoją politykę ochrony środowiska, zmierzającą do minimalizacji odpadów,
- papiery lub tektury stosowane jako materiał opakowaniowy, zawieszki, metki itp. muszą być wykonane z materiałów pochodzących z recyklingu lub być certyfikowane zgodnie z wymaganiami FSC lub PEFC,
- minimalne kryteria społeczne oparte na kluczowych normach Międzynarodowej Organizacji Pracy (ILO) muszą być spełnione przez wszystkich pracowników.

Opis tych kryteriów zestawiono w tabeli 33.

Tabela 33. Opis kryteriów stosowanych przy wydawaniu certyfikatu GOTS dla wyrobów włókienniczych

Kryteria	Opis	Ocena PZS
Surowce przyjazne środowisku	Końcowy produkt musi zawierać surowce pochodzące w co najmniej 95% (lub 70%) z upraw ekologicznych lub upraw w okresie przejściowym (czyli takich, na których m.in. nie stosuje się nawozów sztucznych, pestycydów, herbicydów oraz nasion modyfikowanych genetycznie). Nie może zawierać żadnych domieszek włókien konwencjonalnych tego samego surowca.	
Produkcja przyjazna środowisku	Niskie zużycie środków chemicznych na wszystkich etapach produkcji. Stosowane środki chemiczne muszą spełniać podstawowe wymagania dotyczące nietoksyczności i biodegradowalności. Konieczny jest sprawnie działający system oczyszczania ścieków. Zakaz stosowania metali ciężkich, alergenów, GMO (organizmów modyfikowanych genetycznie), chromu, niklu, miedzi, formaldehydów, PCV, wybielaczy zawierających chlorki i bromki.	
Standardy pracy	Minimalne standardy dot. przestrzegania warunków pracy zgodnie z niektórymi konwencjami Międzynarodowej Organizacji Pracy. Brak kryteriów dot. płacy wystarczającej na życie (GOTS wymaga od producenta spełniania krajowych norm prawnych lub wzorcowych standardów obowiązujących w branży – jeśli są wyższe od krajowych).	
Sprawiedliwy handel	Nie obejmuje.	
Przejrzystość łańcucha dostaw	Nie obejmuje.	

Kolejną instytucją udzielającą certyfikatów na odzież dla dzieci jest Zakład Certyfikacji TEXTIL-CERT Instytutu Włókiennictwa w Łodzi. Prowadzi certyfikację wyrobów w ramach krajowego systemu, działającego w oparciu o Ustawę z dn. 30.08.2002 r. o systemie oceny zgodności (Dz.U. z 2002 r. nr 166, poz. 136 z późniejszymi zmianami). Wydaje certyfikaty uprawniające do oznaczenia wyrobów znakami o nazwach:

- Bezpieczny dla niemowląt,
- Bezpieczny dla dziecka,
- Przyjazny dla człowieka.

Ich ilustracje przedstawiono na rysunku 53.



Rys. 53. Oznaczenia certyfikatów wydawanych przez TEXTIL-CERET

Źródło: [108].

Certyfikacja zgodności potwierdza, że wyrób posiada cechy i spełnia wymagania określone w normach, przepisach prawnych, o kryteriach technicznych. Uzyskane certyfikaty mogą potwierdzać takie cechy, jak:

- trudnozapałalność,
- antyelektrostatyczność,
- właściwości użytkowe,
- właściwości higieniczne,
- ochronę przed działaniem promieniowania UV.

#### **2.4. Opracowanie modelu fizycznego i matematycznego transportu masy i ciepła przez dyskretne struktury wyrobu włókienniczego w układzie: skóra noworodka – wyrób włókienniczy – otoczenie**

Model teoretyczny skóra noworodka – kompozyt włókienniczy – otoczenie to problem złożony. Jest to modelowanie organizmu żywego, co z uwagi na cechy osobnicze nie jest procesem powtarzalnym nawet dla tej samej osoby w różnych warunkach otoczenia, jak i tym bardziej różnych organizmów w różnych warunkach. Tak więc model teoretyczny może mieć tylko charakter orientacyjny, ponieważ obliczenia w ramach symulacji numerycznych można wykonać dla konkretnych, założonych, danych początkowych i warunków brzegowych, co nie zawsze jest reprezentatywne w sensie ogólnym. W sensie

fizycznym system skóra noworodka – kompozyt włókienniczy – otoczenie wprowadza się dla opisu sprzężonego transportu ciepła i masy od ciała noworodka, przez jego ubiór traktowany jako kompozyt włókienniczy, do otoczenia. Skóra noworodka ma określony poziom ciepła i wilgotności, co jest opisywane przez określone warunki brzegowe, czyli z punktu widzenia optymalizacji – zmienne stanu. Otoczenie to zamknięta przestrzeń inkubatora zdefiniowana za pomocą określonych wartości zmiennych stanu, tj. mikroklimatu inkubatora.

#### **2.4.1. Modelowanie systemu: skóra noworodka – kompozyt włókienniczy – otoczenie**

Istnieją różne modele fizyczne opisu zagadnienia, jednak podstawa to zawsze sformułowanie bilansowe. Można tego dokonać rozpatrując fizjologię noworodka, czyli uwzględniając w bilansie metabolizm, oraz różne możliwości utraty ciepła przez organizm. Główny punkt odniesienia to ciało dziecka, ubiór i inne sposoby utraty ciepła (promieniowanie, pocenie się, konwekcja itp.) są modelowane zależnościami w większości empirycznymi. Zalety tej metody to:

- globalne ujęcie wymiany ciepła dla całego organizmu, można określić zjawiska w skali makro, prowadzące do przegrzania (hipertermii) lub schładzania organizmu (hipotermii),
- model ten uwzględnia wszystkie sposoby utraty ciepła, włącznie z mającymi charakter marginalny utratą ciepła przez śluzówkę i odparowanie w układzie oddechowym,
- model ten rozpatruje też sprzężone przewodzenie ciepła, ponieważ został uwzględniony transport ciepła z masą (pot noworodka) podczas parowania.

Wadami tej metody są:

- niemożliwość określenia rozkładu wilgoci, ponieważ model nie uwzględnia wyznaczania tej wielkości,
- nie jest też możliwe wyznaczenie zmienności pola zmiennych stanu (temperatury), ponieważ nie wprowadza on opisu w skali lokalnej, dlatego nie jest możliwe określenie zjawisk zachodzących w odzieży w skali lokalnej, takich jak wprowadzenie materiałów zmiany fazy, złożona konstrukcja ubioru, zmienne warunki otoczenia itp.,
- dotychczasowy znany opis tej metody wykorzystuje znaczną ilość zależności empirycznych, co nadaje mu charakter nieuniwersalny, dopiero zastosowanie ogólnych zależności matematycznych umożliwi w pełni uniwersalny opis.

#### **2.4.2. Wymiana strumienia ciepła w układzie: skóra noworodka – wyrób włókienniczy – otoczenie w ujęciu fizjologicznym**

W niniejszym opracowaniu podjęto próbę stworzenia modelu wymiany ciepła, masy w układzie: skóra noworodka – wyrób włókienniczy – otoczenie w oparciu o bilans ciepła. Podstawowe cechy bilansu omówiono poniżej:



- model jest wieloparametrowy, wykorzystujący bilans ciepła dla ciała noworodka, wymiana masy jest modelowana wyłącznie za pomocą opisu pocenia się,
- składniki bilansu są wyrażone w  $kJ \cdot h^{-1} \cdot kg_{masy\ ciala}^{-1}$ ,
- podstawowe ujęcie bilansowe jest też opisane w PN-EN ISO 7933 [11], opis w tym źródle jest uniwersalny, odnosi się do wszystkich organizmów i dobór danych dla noworodków nie zawsze jest tam reprezentatywny,
- z powodu opisanego powyżej, należy wykorzystać inne źródła literaturowe dla dokładnego określenia danych, mogą być to Agourram, Bach, Tourneux, Krim, Delnaud, Libert [10], Sedin [109],
- bilans ciepła odnosi się do całego ciała noworodka, wpływ odzieży, okrycia i czynników otoczenia jest modelowany za pomocą odpowiednich współczynników w składnikach bilansu.

Niezależnie od analogicznej zasady przedstawienia poszczególnych składników przez Agourrama i innych [10] oraz Sedina [109] występują różnice między omawianymi przez przytoczonych autorów i przedstawionymi w normie PN-EN ISO 7933 [11] modelami. Są one następujące:

- wszystkie składniki są odniesione do masy ciała noworodka,
- większość współczynników została zdefiniowana w odniesieniu do powierzchni jednostkowej,
- w przypadku noworodka brak jest pewnych składników, np. efektywnej pracy mechanicznej,
- przepływ masy jest modelowany za pomocą niektórych współczynników w całym bilansie ciepła.

Szczególnie ważne jest ostatnie stwierdzenie, ponieważ oznacza nieuwzględnienie bilansu masy (wilgoci). Jest to o tyle niedogodne, że według zasady sprzężonego przewodzenia ciepła i masy, część ciepła jest transportowana z masą (wilgocią). W sensie sprzężonego transportu ciepła i masy można również stwierdzić, że nigdzie poza pracą Sedina [109] nie jest uwzględniany przepływ masy (dyfuzja wilgoci) jako osobno opisywane zjawisko. W innych źródłach przepływ ten jest przedstawiany wyłącznie za pomocą określonych współczynników oraz związków opisywanych częściowo empirycznie. Nigdzie nie jest uwzględniany model sprzężonego przepływu masy i ciepła jako opis dwóch podstawowych sposobów transportu. Zasada transportu wilgoci według Sedina [109] polega na opisie dyfuzji masy (wilgoci) za pomocą równania różniczkowego pierwszego rzędu z uwagi na odparowywaną masę oraz ciśnienie. Zakłada się, że masa jest transportowana wyłącznie w jednym kierunku, od ciała noworodka na zewnątrz. Opis ten jest wyłącznie jednowymiarowy, za pomocą współrzędnej  $x$ . Samo zjawisko wymiany masy (wilgoci) jest opisane przez Sedina następująco:

$$\frac{1}{A} \frac{dm}{dt} = D \frac{dp}{dx}, \quad (140)$$

czyli jest funkcją: masy  $m$  odparowywanej substancji, wyrażonej w  $g$ , powierzchni odparowania  $A$ , wyrażonej w  $m^2$ , czasu rzeczywistego  $t$ , wyrażonego w  $h$ , współczynnika dyfuzji  $D'$ , określonego w  $g \cdot m^{-1} \cdot h^{-1} \cdot Pa^{-1}$ , ciśnienia  $p$ , określonego w  $Pa$ , współrzędnej  $x$ , wyrażonej w  $m$ . Współczynnik dyfuzji masy  $D'$  to funkcja temperatury  $T$  określona w postaci:

$$D' = \frac{DM}{RT} \frac{T^{1.75}}{300} \frac{101 \cdot 10^3}{p_{atm}}. \quad (141)$$

Współczynnik ten jest zatem funkcją: molowego współczynnika dyfuzji  $D$ , określonego w  $g \cdot m^{-1} \cdot h^{-1} \cdot Pa^{-1} \cdot mol^{-1}$ , masy cząsteczkowej  $M$ , wyrażonej w  $kg$ , uniwersalnej stałej gazowej  $R$ , wyrażonej w  $J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$ , ciśnienia atmosferycznego  $p_{atm}$ , wyrażonego w  $Pa$ . Z powodu kłopotliwego opisu problemu, Sedin charakteryzuje transport masy za pomocą wielkości transepidermalnej utraty wilgoci (Transepidermal Water Loss) TEWL. Jest on definiowany jako średni wydatek wilgoci przez skórę, określony przez związek:

$$TEWL = 0,92 \cdot ER + 1,37, \quad (142)$$

który jest funkcją: wydatku parowania  $ER$ , wyrażonego w  $g \cdot m^{-1} \cdot h^{-1}$ . Jak wynika z powyższego opisu, transport masy (wilgoci) jest opisywany jako osobne zjawisko, niepowiązane z transportem ciepła. Zakłada się jego zmienność tylko względem jednej współrzędnej, czyli grubości materiału. Oznacza to zawężenie problemu do jednowymiarowego, co nie zawsze oddaje zasadę transportu dla materiałów grubszych lub niejednorodnych.

Rozważmy następnie bilans ciepła w ujęciu fizjologicznym, sformułowany dla dziecka leżącego w inkubatorze. Opiera się on na równości ciepła dostarczanego i traconego różnymi sposobami. Należy następnie rozpatrzyć jego poszczególne składniki. Ciepło dostarczane wynika z metabolizmu organizmu (metaboliczna produkcja ciepła przez organizm)  $M$  wyrażonego w  $W \cdot m^{-2} \cdot kg^{-1}$ . Transport ciepła oddawanego lub pochłanianego odbywa się na drodze: przewodzenia ciepła  $K$ , jednostka –  $W \cdot m^{-2} \cdot kg^{-1}$ , promieniowania na powierzchniach zewnętrznych  $R$ , jednostka – jw., konwekcji na powierzchniach zewnętrznych  $C$ , jednostka – jw., parowania skóry  $E$ , jest to jedyny składnik odnoszący się do transportu wilgoci, jednostka – jw. Przyjęty model bilansu cieplnego zakłada, że ciepło jest tracone przez 6 części ciała. Są to: głowa, tułów, oba ramiona, obie nogi. Ciepło tracone jest określane dla każdej ze zdefiniowanych wcześniej części ciała jako suma składników:

$$\text{Ciepło tracone} = R_i + C_i + K_i + E_i \quad (143)$$

Podczas obliczeń bilansu przyjmuje się, że poza utratą ciepła z sześciu części ciała w sposób opisany zależnością (143), występuje dodatkowo utrata ciepła z całości ciała przez: błonę śluzową (śluzówkę)  $C_{resp}$  i odparowanie w układzie oddechowym  $E_{resp}$ . Różnica metabolizmu organizmu  $M$  i strat ciepła określa wartość ciepła odkładanego w ciele człowieka. Metabolizm jest określany za

pomocą wzoru empirycznego jako funkcja współczynnika przeliczeniowego 4,185, który wynika z przejścia na jednostki  $\text{kJ}\cdot\text{h}^{-2}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Można to wyrazić następująco:

$$M = (0,00165A^3 - 0,138A^2 + 3,56A + 35,4) \frac{4,185}{24}, \quad (144)$$

gdzie  $A$  jest liczbą dni noworodka po urodzeniu. Ostateczna postać bilansu ciepła jest możliwa do zapisania zależnością:

$$M - \sum_{i, \text{ wszystkie czesci ciala}} (R_i + C_i + K_i + E_i + C_{resp} + E_{resp}) = S. \quad (145)$$

W zależności od wartości ciepła dostarczanego (metabolizm) oraz traconego różnymi sposobami występuje równowaga termiczna lub jej brak. Jest opisana za pomocą nadwyżki ciepła  $S$ . Jeśli  $S = 0$ , to ciało produkuje tyle ciepła, ile jest wydalane na zewnątrz, jest w stanie równowagi termicznej, temperatura jest stała. Jeśli  $S > 0$ , to ciało produkuje więcej ciepła niż jest odprowadzane na zewnątrz, nadwyżka ciepła pozostaje w organizmie, temperatura rośnie. Występuje tzw. hipertermia (przegrzanie organizmu). Jeśli  $S < 0$ , to ciało produkuje mniej ciepła niż jest odprowadzane na zewnątrz, występuje niedobór ciepła, temperatura spada. Występuje tzw. hipotermia (wyziębienie organizmu).

Rozważmy następnie kolejne składniki opisujące straty ciepła w poszczególnych częściach ciała noworodka. Strata ciepła przez przewodzenie jest zależna od przepływu ciepła, wyrażonego za pomocą różnicy temperatur. Można ją zapisać następująco:

$$K_i = h_k (T_i - T_m) A_{ki} W_t^{-1}. \quad (146)$$

Poszczególne składniki związku (146) można zdefiniować w postaci: powierzchni styku skóry części ciała z materacem  $A_{ki}$  wyrażonej w  $\text{m}^2$ , współczynnika przewodzenia ciepła  $h_k = 0,84 \text{ kJ}\cdot\text{h}^{-2}\cdot\text{kg}^{-1}$ , różnicy temperatur między powierzchnią skóry każdej części ciała  $T_i$  oraz materacem  $T_m$ , mierzonej w  $^{\circ}\text{C}$  za pomocą termometru na podczerwień, masy ciała noworodka  $W_t$ , wyrażonej w  $\text{kg}$ . Strata ciepła przez promieniowanie, zgodnie z klasycznym jego opisem, to funkcja różnic czwartych potęg charakterystycznych temperatur. Można to zapisać jako:

$$R_i = \sigma \varepsilon_{sk} A_{ri} \left( (T_i + 273)^4 - (T_r + 273)^4 \right) W_t^{-1} F_{cl}. \quad (147)$$

Jest to zatem funkcja następujących składników: średniej temperatury promieniowania  $T_r$  mierzonej w  $^{\circ}\text{C}$  termometrem kulistym wg normy ISO 7726 [13], średniej temperatury skóry  $T_i$  mierzonej w  $^{\circ}\text{C}$  termometrem na podczerwień, współczynnika bezwymiarowego współczynnika przepuszczalności promieniowania cieplnego przez izolację cieplną ubioru (przyjęto  $F_{cl} = 0,86$  dla kombinacji specjalnego ubioru medycznego w postaci folii dla noworodków i dzianiny

oraz  $F_{cl} = 0,98$  dla samego ubioru medycznego dla noworodków przy założeniu zakresów od  $F_{cl} = 1$  dla ubioru w pełni przepuszczalnego do  $F_{cl} = 0$  dla ubioru nieprzepuszczalnego), stałej Stefana-Boltzmana  $\sigma = 5,666667 \cdot 10^{-8} \text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ , emisyjności skóry  $\varepsilon_{sk} = 0,97$ , promieniującej powierzchni skóry danej części ciała  $A_{ri}$ , w  $\text{m}^2$ . Strata ciepła przez konwekcję to funkcja zależna od przepływu ciepła, wyrażonego za pomocą różnicy temperatur. Matematycznie można to określić w postaci:

$$C_i = h_{ci}(T_i - T_a)A_{ci}F_{pcl}W_t^{-1}. \quad (148)$$

Powyższą zależność można zapisać jako funkcję składników: temperatury otaczającego czynnika (powietrza)  $T_a$  mierzonej w  $^{\circ}\text{C}$ , temperatury lokalnej danej części ciała  $T_i$  mierzonej w  $^{\circ}\text{C}$ , powierzchni skóry danej części ciała poddanej promieniowaniu cieplnemu  $A_{ci}$  wyrażonej w  $\text{m}^2$ , współczynnika konwekcji danej części ciała  $h_{ci}$  wyrażonego w  $\text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ , bezwymiarowego współczynnika przepuszczalności transportu pary wodnej przez izolację cieplną ubioru  $F_{pcl}$ , zakres od  $F_{pcl} = 1$  dla ubioru w pełni przepuszczalnego do  $F_{pcl} = 0$  dla ubioru nieprzepuszczalnego. Strata ciepła przez parowanie z danej części ciała to funkcja różnicy ciśnień pary wodnej między powierzchnią danej części ciała, zapisana jako związek:

$$E_i = h_{ei}w(P_{s,H_2O} - P_{a,H_2O})A_{ei}F_{pcl}W_t^{-1}, \quad (149)$$

który zależy od: współczynnika parowania z danej części ciała  $h_{ei} = 1,67 h_{ci}$  wyrażonego w jednostkach  $\text{kJ}\cdot\text{h}\cdot\text{mb}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ , który wyznacza się z równania Lewisa, wilgotności względnej skóry  $w = 0,06$  w chłodnym otoczeniu, bez pocenia się ciała (to wielkość, która modeluje wpływ ubioru, w jakim znajduje się noworodek), cząstkowej różnicy ciśnień pary wodnej między powierzchnią danej części ciała  $P_{s,H_2O}$  i powietrzem  $P_{a,H_2O}$  przyjętej do obliczeń jako równej  $20,1 \text{ mb} = 20,1 \text{ hPa}$ , powierzchni skóry danej części ciała poddanej parowaniu  $A_{ei} = A_{ci}$  wyrażonej w  $\text{m}^2$ , bezwymiarowego współczynnika przepuszczalności transportu pary wodnej przez izolację cieplną ubioru  $F_{pcl}$  (zakres od  $F_{pcl} = 1$  dla ubioru w pełni przepuszczalnego do  $F_{pcl} = 0$  dla ubioru nieprzepuszczalnego). Niezależnie od wskaźników zdefiniowanych zależnościami (146)-(149) dla każdej z 6 części ciała, istnieją dwa składniki określone dla całego ciała noworodka. Strata ciepła dla całego ciała to suma: straty przez błonę śluzową (śluzówkę)  $C_{resp}$  i straty przez odparowanie w układzie oddechowym  $E_{resp}$ . Oba powyższe składniki są funkcjami: pojemności cieplnej powietrza  $C_p = 1,044 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ , temperatury wdychanego powietrza równej temperaturze otoczenia  $T_i = T_a$ , temperatury wydychanego powietrza  $T_E$ , określanej według Hansona jako:

$$T_E = \frac{32,6 + 0,066T_a + 32P_{a,H_2O}}{462(T_a + 273)} \quad (150)$$

oraz ciepła przemiany fazowej parowania  $\delta = 243 \cdot 10^3 \text{ kJ} \cdot \text{g}_{\text{wody}}^{-1}$ , wydatku oddechowego płuc  $V_E$ , wyrażonego w  $(3600)^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ , wilgotności bezwzględnej wydychanego powietrza  $M_E$  wyrażonej w  $\text{kg}_{\text{wody}} \cdot \text{kg}_{\text{suchego powietrza}}^{-1}$ , patrz norma ISO 7726 [13], wilgotności bezwzględnej wdychanego powietrza  $M_I$  wyrażonej w  $\text{kg}_{\text{wody}} \cdot \text{kg}_{\text{suchego powietrza}}^{-1}$ , ciśnienia cząstkowego pary wodnej w wydychanym powietrzu  $P_E$ , wyrażonego w  $\text{kPa}$ . Wymienione wielkości fizyczne można zapisać następującymi wzorami:

$$C_{resp} = V_E C_P (T_E - T_I) W_t^{-1} \quad (151)$$

$$E_{resp} = V_E \delta (M_E - M_I) W_t^{-1} \quad (152)$$

$$M_E = 0,622 \frac{P_E}{(100 - P_E)} \quad (153)$$

$$P_E = 0,611 \text{ e}^{\frac{17,27 T_E}{T_E + 273}} \quad (154)$$

### 2.4.3. Opracowanie metodyki weryfikacji opracowanego modelu w oparciu o metody pomiarowe odnoszące się do wyrobów płaskich

Parametry przyjętego modelu należy dobierać starannie. Ciąła noworodków mają inne zakresy parametrów niż człowiek dorosły. Najbardziej reprezentatywne źródła [10, 110] zawierają dane średnie określone dla 30 noworodków. Dla 14 noworodków określono następujące parametry: masa ciała  $W_t = (1,060 \pm 0,026) \text{ kg}$ , wiek po urodzeniu  $(4,5 \pm 0,4) \text{ dnia}$ , powierzchnia ciała całkowita  $(0,106 \pm 0,010) \text{ m}^2$ , temperatura powietrza początkowa  $T_{a0} = 33,2^\circ\text{C}$ , średnia temperatura promieniowania  $T_r = 30,6^\circ\text{C}$ . Do obliczeń przyjęto następnie dane wg Agourram et al. [10] uzyskane na próbcie 16 noworodków. Średnia masa ciała  $W_t = (1,065 \pm 0,024) \text{ kg}$ , wiek po urodzeniu  $A = (4,4 \pm 0,3) \text{ dnia}$ , temperatura powietrza  $T_a = (31,8 \pm 1,2)^\circ\text{C}$ , średnia temperatura promieniowania  $T_r = 29,8^\circ\text{C}$ , całkowita powierzchnia ciała  $(0,106 \pm 0,010) \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ . Według tego samego źródła [10] przyjęte zostały względne udziały procentowe całkowitej powierzchni ciała: 0,28 głowa, 0,23 tułów, 0,19 ramiona, 0,30 nogi.

W taki sposób zostały wyznaczone wartości następujących wielkości fizycznych (tabela 34, tabela 35): temperatury powierzchni poszczególnych części ciała  $T_i$  wyrażone w  $^\circ\text{C}$ , współczynnika konwekcji danej części ciała  $h_c$  wyrażone w  $\text{kJ} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ , powierzchni wymiany ciepła różnych części ciała  $A$  wyrażone w  $\text{m}^2$ ; powierzchni promieniowania  $A_{ri}$ , powierzchni konwekcji  $A_{ci}$ , powierzchni przewodzenia  $A_{ki}$ .

Tabela 34. Temperatury i współczynniki konwekcji danej części ciała

Część ciała	w ubiorze		bez ubioru	
	$T_i$ , °C	$h_{ci}$ , $\text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{°C}^{-1}$	$T_i$ , °C	$h_{ci}$ , $\text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{°C}^{-1}$
głowa	35,53±0,72	3,63±0,11	32,82±1,84	3,60±0,17
tułów	34,93±0,79	2,84±0,09	32,33±1,30	2,82±0,10
ramię (jedno)	32,10±0,65	4,02±0,03	29,50±1,85	3,97±0,05
noga (jedna)	34,36±0,79	3,84±0,04	31,57±1,50	3,82±0,05
całe ciało	34,37±0,68	3,63±0,07	31,71±1,76	3,60±0,08

Tabela 35. Powierzchnie danej części ciała

Część ciała	Powierzchnia, $10^{-3}\text{m}^2$		
	$A_{ri}$	$A_{ci}$	$A_{ki}$
głowa	21,43±0,08	22,63±0,05	1,44±0,04
tułów	7,10±0,08	1,97±0,07	3,75±0,05
ramię (jedno)	4,42±0,05	5,40±0,05	0,40±0,05
noga (jedna)	10,06±0,04	11,99±0,05	0,90±0,04
całe ciało	55,04±0,07	56,76±0,06	7,74±0,05

Jak wynika z tabeli 35 i opisu ciała noworodków, nie cała powierzchnia skóry bierze udział w poszczególnych formach wymiany ciepła. Ponieważ całkowita powierzchnia ciała została przyjęta jako  $(0,106\pm 0,010)\text{ m}^2$ , stąd utrata ciepła przez promieniowanie i konwekcję zachodzi na około połowie tej powierzchni, zaś przewodzenie do materaca na powierzchni rzędu 7,3% powierzchni całkowitej. W rozważaniach jako ubiór noworodka przyjęto specjalny ubiór medyczny dostępny handlowo, który jest transparentny dla promieniowania podczerwonego (98% przepuszczalności).

Dla symulacji redukcji utraty ciepła przez głowę można wprowadzić modelowanie tego zjawiska za pomocą czepka. Jest ona opisywana za pomocą izolacyjności cieplnej  $I_{cl}$ , która jest wyrażona w  $\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$ :

$$I_{cl} = 0,067 \cdot 10^{-2} A_{co} + 0,217 Th A_{co}, \quad (155)$$

i zależy od: procentowej wartości powierzchni głowy pokrytej przez czepkę  $A_{co}$  oraz grubości materiału  $Th$ , wyrażonej w  $m$ . Współczynnik utraty ciepła można opisać zależnością podaną przez Nishie'a i Gagge'a [111]. Dla wymiany ciepła przez promieniowanie i konwekcję można tę wielkość fizyczną zapisać następująco:

$$F_{cl-głowa} = \left[ (h_{c-głowa} + h_{r-głowa}) I_{cl} + (1 + 1,97 I_{cl})^{-1} \right]^{-1}, \quad (156)$$

gdzie dla głowy przyjęto współczynnik transportu ciepła przez konwekcję  $h_{c-głowa}$  równy współczynnikowi transportu ciepła przez promieniowanie  $h_{r-głowa}$ .

Odpowiednio dla utraty ciepła ze skóry przez parowanie współczynnik utraty ciepła przyjmuje postać:

$$F_{p\text{cl-głowa}} = \left\{ \left( 1 + 2,22h_{c\text{-głowa}} \right) \left[ I_{cl} - \left[ 1 - (1,971I_{cl})^{-1} (h_{c\text{-głowa}} + h_{r\text{-głowa}}) \right]^{-1} \right] \right\}^{-1} \quad (157)$$

W dalszych rozważaniach przyjęto następujące warunki otoczenia (pokój pielęgniarek, inkubator otwarty do otoczenia przednią ścianką i górną klapą):

- temperatura powietrza  $T_a = (23,2 \pm 0,2)^\circ\text{C}$ ,
- średnia temperatura promieniowania  $T_r = (19,9 \pm 0,2)^\circ\text{C}$ ,
- wilgotność względna otoczenia  $w = (44 \pm 1,9)\%$ ,
- temperatura inkubatora po częściowym wymieszaniu z powietrzem otoczenia  $T_a = (23,2 \pm 0,2)^\circ\text{C}$ ,
- prędkość powietrza  $v = 0,06 \text{ ms}^{-1}$ ,
- temperatura powierzchni materaca  $T_m = (31,4 \pm 0,1)^\circ\text{C}$ .

Obliczenia zostały przeprowadzone w dwóch przypadkach, dla których określa się czas osiągnięcia szkodliwej temperatury dla noworodka, ubranego w odzież funkcjonalną. Przypadki te są następujące: określenie wpływu izolacji termicznej zapewnianej przez czepek na bilans ciepła, w funkcji stałego metabolizmu organizmu. Jest to przypadek statyczny (stały metabolizm). W zależności od wartości izolacji termicznej czepka może dojść do hipertermii (przegrzania) lub hipotermii (schłodzenia organizmu). Drugie istotne zagadnienie poddane rozważaniom to wzrost metabolizmu przy jednoczesnej stałej temperaturze skóry noworodka, co może spowodować hipertermię (przegrzanie). Jest to przypadek dynamiczny (zmienny metabolizm noworodka). Jeśli mamy do czynienia z hipotermią, wówczas określa się wyłącznie spadek temperatury ciała według zależności:

$$\Delta T_b = S(W_t C_p)^{-1}. \quad (158)$$

Powyższa zależność to funkcja: nadwyżki ciepła akumulowanej w ciele  $S$  wyrażonej w  $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ , masy ciała noworodka  $W_t$  wyrażonej w  $\text{kg}$ , ciepła właściwego tkanek  $C_p = 3,494 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Metabolizm ciała pozostaje w tym przypadku stały, bez zmian. W przypadku hipertermii i wzrostu temperatury zasadnicze znaczenie mają czasy wzrostu temperatur: od  $37^\circ\text{C}$  do  $38^\circ\text{C}$  (określany jako  $t_{38^\circ\text{C}}$ ), od  $37^\circ\text{C}$  do  $40^\circ\text{C}$  (określany jako  $t_{40^\circ\text{C}}$ ), od  $37^\circ\text{C}$  do  $43^\circ\text{C}$  (określany jako  $t_{43^\circ\text{C}}$ ). Wszystkie są wyrażone w  $h$ . Można je zapisać jako:

$$t_{38^\circ\text{C}} = 3,49W_t S^{-1}, t_{40^\circ\text{C}} = 3 \cdot 3,49W_t S^{-1}, t_{43^\circ\text{C}} = 6 \cdot 3,49W_t S^{-1}. \quad (159)$$

Pierwszy z tych czasów jest określany jako ostrzegawczy, dla którego organizm noworodka sam może zrównoważyć bilans cieplny. Pozostałe to próg śmiertelności dla niemowląt. Drugi przypadek jest określony podobnie w sensie obliczeń, ale metabolizm ciała rośnie. Zakłada się, iż jego wzrost opisać można funkcją logarytmiczną zgodnie z prawem van Hoffa-Arrheniusa, czyli według tzw. efektu  $Q_{10}$ :

$$M = M_{\min} 2,29^{\frac{(T_b-37)}{10}}, \quad (160)$$

gdzie  $T_b$  oznacza temperaturę ciała noworodka wyrażoną w °C.

Rozważmy pierwszy z powyższych przypadków. Przewodzenie ciepła z ciała noworodka do materaca dla wszystkich części ciała zostało przedstawione w tabeli 36. Uwzględniony został fakt okrycia głowy przez czepek, chociaż według wzoru nie jest konieczne podawanie procentowego udziału tego okrycia.

Tabela 36. Strata ciepła przez przewodzenie (konwekcję) wszystkich części ciała

Część ciała	Strata ciepła przez przewodzenie, $\text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$
Głowa	0,0047
Tułów	0,0105
Ramię (jedno)	0,0002
Noga (jedna)	0,0021
Całe ciało	0,0182

Z uwagi na niewielkie wartości straty ciepła nie zostały przeprowadzone dalsze symulacje numeryczne tej wielkości. Straty ciepła przez promieniowanie głowy w funkcji grubości okrywającego czepka zostały przedstawione w tabeli 37. Zostały przyjęte trzy grubości materiału czepka. Zgodnie z przytoczonymi związkami dotyczącymi promieniowania, opór cieplny jest modelowany niezależnie od składu materiału czepka, jedynie jako funkcja jego grubości. Przyjęto trzy główne udziały procentowe okrycia głowy przez czepek: 20%, 60% i 100%. Dwie pierwsze to wartości często spotykane, trzecia określa maksymalną wartość, do jakiej można sprowadzić opór cieplny w przypadku głowy. Jest to też równoznaczne z minimalizacją strat ciepła.

Tabela 37. Strata ciepła przez promieniowanie (radiację) dla głowy

Grubość czepka, $m$	Strata ciepła przez promieniowanie (radiację) dla głowy, $\text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$		
	Udział procentowy okrycia głowy przez czepek		
	20%	60%	100%
0,001	1,7265	1,4639	1,2645
0,003	1,6550	1,3126	1,0788
0,005	1,5886	1,1871	0,9373

Wyniki wskazują, że strata ciepła przez promieniowanie jest zmienna w szerokich granicach, nawet do 100% w zależności od wartości minimalnej. Jest to najbardziej znacząca strata ciepła w ciele noworodka. Straty ciepła przez konwekcję głowy w funkcji grubości okrywającego czepka zostały przedstawione w tabeli 38. Podobnie jak poprzednio są przyjęte trzy grubości materiału czepka.



Konwekcja jest czynnikiem znaczącym i może być również zmienna w szerokich granicach, podobnie jak promieniowanie. Daje to największą możliwość szerokiego operowania oporami cieplnymi czepka i przeciwdziałania hipotermii lub hipertermii.

Tabela 38. Strata ciepła przez konwekcję (unoszenie) dla głowy

Grubość czepka, <i>m</i>	Strata ciepła przez konwekcję (unoszenie) dla głowy, $\text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$		
	Udział procentowy okrycia głowy przez czepkę		
	20%	60%	100%
0,001	0,8726	0,7399	0,6391
0,003	0,8365	0,6634	0,5453
0,005	0,8029	0,6000	0,4737

Straty ciepła przez parowanie głowy w funkcji trzech grubości okrywającego czepka zostały przedstawione w tabeli 39.

Tabela 39. Strata ciepła przez parowanie dla głowy

Grubość czepka, <i>m</i>	Strata ciepła przez parowanie dla głowy, $\text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$		
	Udział procentowy okrycia głowy przez czepkę		
	20%	60%	100%
0,001	1,6629	1,4100	1,2179
0,003	1,5941	1,2643	1,0391
0,005	1,5300	1,1434	0,9027

Strata ciepła przez parowanie jest zmienna również w szerokich granicach, ale nie tak znacznych jak w przypadku promieniowania i konwekcji. Jest to znacząca wartość, druga pod względem znaczenia w przypadku głowy noworodka. Kolejne obliczenia dotyczą pozostałych mechanizmów utraty ciepła dla innych części ciała. W obliczeniach przyjęta  $F_{cl} = 0,86$  dla kombinacji specjalnego ubioru medycznego w postaci folii dla noworodków i dzianiny oraz  $F_{cl} = 0,98$  dla samego ubioru medycznego dla noworodków (patrz tabela 40 z uwzględnieniem tabeli 34 i tabeli 35).

Tabela 40. Strata ciepła przez promieniowanie dla innych części ciała

Część ciała	Strata ciepła przez promieniowanie, $\text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$	
	$F_{cl} = 0,98$	$F_{cl} = 0,86$
tułów	0,5885	0,5164
ramię (jedno)	0,2931	0,2572
noga (jedna)	0,7999	0,7019

Zgodnie z tabelą 40 występują znaczne różnice między oboma przypadkami, dla takich samych pozostałych warunków obliczeń. Oznacza to, że sama folia nie spełnia optymalnie swojego celu stosowania i wymaga zastosowania dodatkowych materiałów (np. dzianiny). Strata ciepła przez konwekcję dla pozostałych części ciała w takich przypadkach jak wyżej została przedstawiona w tabeli 41.

Tabela 41. Strata ciepła przez konwekcję dla innych części ciała

Część ciała	Strata ciepła przez konwekcję, $\text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$	
	$F_{cl} = 0,98$	$F_{cl} = 0,86$
tułów	0,0607	0,0532
ramię (jedno)	0,1786	0,1567
noga (jedna)	0,4750	0,4169

Zgodnie z tabelą 41 występują różnice między oboma przypadkami, dla takich samych pozostałych warunków obliczeń. Nie są one jednak tak znaczne jak dla promieniowania (tabela 40). W tabeli 42 została przedstawiona strata ciepła przez parowanie dla pozostałych części ciała.

Tabela 42. Strata ciepła przez parowanie dla innych części ciała

Część ciała	Strata ciepła przez parowanie, $\text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$
tułów	0,0091
ramię (jedno)	0,0355
noga (jedna)	0,0752

Z uwagi na niewielkie wartości straty ciepła nie zostały przeprowadzone dalsze symulacje numeryczne straty ciepła przez parowanie. Jako ostatnie zostaną określone straty ciepła w całym organizmie: strata ciepła przez śluzówkę  $C_{resp}$  oraz odparowanie w układzie oddechowym  $E_{resp}$ . Wyniki symulacji przedstawiono w tabeli 43

Tabela 43. Straty ciepła ogólnoustrojowe

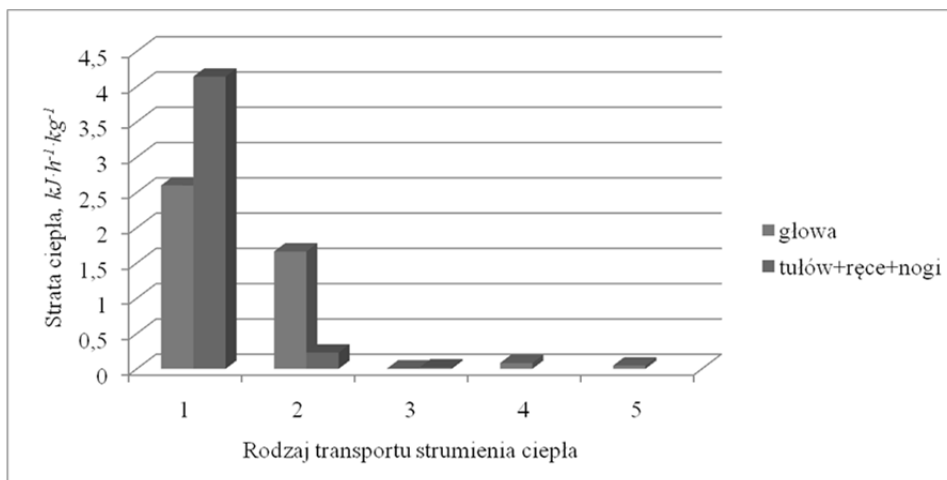
Strata ciepła przez: $\text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$	
śluzówkę $C_{resp}$	odparowanie w ukł. oddechowym $E_{resp}$
0,0824	0,0458

Jak wynika z powyższych obliczeń, najbardziej newralgiczną częścią ciała noworodka jest głowa. Dlatego należy dokonać zestawienia strat ciepła osobno dla głowy i pozostałych części ciała, co zostało przedstawione w tabeli 44 i na rysunku 54. Przyjęto przy tym najbardziej niekorzystny przypadek z punktu fizjologii noworodka, czyli:

- noworodek znajduje się w specjalnym ubiorze medycznym w postaci folii, o przepuszczalności promieniowania podczerwonego 98% (współczynnik przepuszczalności promieniowania cieplnego  $F_{cl} = 0,98$ ),
- głowa jest osłonięta czepkiem o grubości 1 mm, na najmniejszej powierzchni 20% procent okrycia głowy.

Tabela 44. Całkowita strata ciepła przez głowę i inne części ciała

Rodzaj straty ciała	Miejsce strata ciepła	
	głowa	tułów+ręce+nogi
sucha strata ciepła (promieniowanie + konwekcja)	2,5991	4,1417
strata z wymianą wilgoci (parowanie)	1,6629	0,2305
przewodzenie	0,0047	0,0197
straty ogólnoustrojowe (śluzówka + odparowanie ukł. oddech.)	$C_{resp} = 0,0824$	$E_{resp} = 0,0458$
Suma	$8,7868 \text{ kJ}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$	



Rys. 54. Wizualizacja strat ciepła w rozkładzie głowa/reszta ciała: 1 – promieniowanie +konwekcja, 2 – parowanie; 3 – przewodzenie, 4 – śluzówka, 5 – odparowanie w układzie oddechowym

Źródło: opracowanie własne.

Zgodnie z zależnością (144), metabolizm jest określany doświadczalnie jako funkcja ilości dni noworodka. Przyjmując zgodnie z danymi wejściowymi do obliczeń  $A = 4,5 \text{ dnia}$  otrzymuje się  $M = 8,5052 \text{ kJ}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Oznacza to, że w tym przypadku zgodnie z zależnością (145) zachodzi:

$$S = M - \sum_1 (R_i + C_i + K_i + C_{resp} + E_{resp}) = 8,5052 - 8,7868 = -0,2816 \text{ kJ}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1} \quad (161)$$

Z powyższej zależności wynika, że nadwyżka ciepła w organizmie  $S$  jest ujemna. Zachodzi hipotermia, czyli niebezpieczeństwo wychłodzenia organizmu. Zmiana temperatury w czasie jest określona za pomocą zależności (158). Można zapisać:

$$\Delta T_b = S(W_t C_p)^{-1} = -0,0760 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{h}^{-1} \quad (162)$$

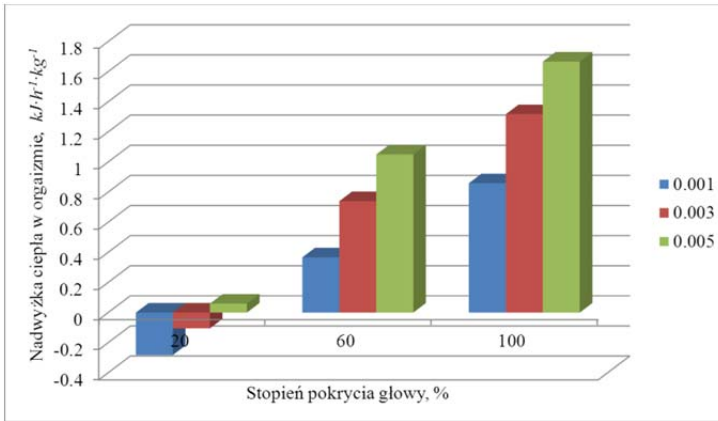
Z taką prędkością następuje wychładzanie organizmu noworodka. Aby temu zapobiec, należy zmienić wydatek ciepła organizmu, ponieważ jego metabolizm pozostaje bez zmian. Można to zrobić za pomocą trzech sposobów:

- wzrostu procentowego udziału okrycia głowy przez czepek,
- wzrostu grubości materiału czepka,
- zmiany materiału ubioru okrywającego ciało noworodka i zastosowanie kombinacji ubioru medycznego, czyli folii i dzianiny o współczynniku przepuszczalności promieniowania cieplnego  $F_{cl} = 0,86$ .

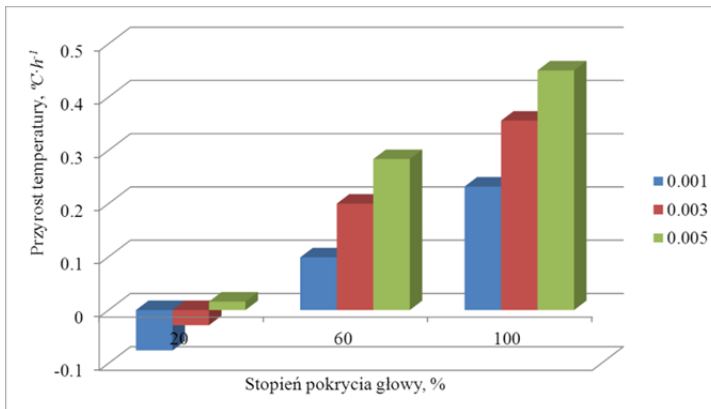
Tabela 45. Nadwyżka ciepła w organizmie, przyrost temperatury, czasy charakterystyczne dla współczynnika przepuszczalności promieniowania cieplnego  $F_{cl} = 0,98$

Grubość czepka, $m$	Nadwyżka ciepła w organizmie, $\text{kJ} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$		
	Udział procentowy okrycia głowy przez czepek		
	20%	60%	100%
0,001	-0,2816	0,3667	0,8590
0,003	-0,1051	0,7402	1,3174
0,005	0,0590	1,0500	1,6668
Przyrost temperatury $^\circ\text{C} \cdot \text{h}^{-1}$			
0,001	-0,0760	0,0990	0,2319
0,003	-0,0284	0,1999	0,3557
0,005	0,0159	0,2835	0,4500
Czas $t_{38^\circ\text{C}}$ h			
0,001	0	10,0897	4,3065
0,003	0	4,9979	2,8082
0,005	62,7086492	3,5231	2,2195
Czas $t_{40^\circ\text{C}}$ h			
0,001	0	30,2691	12,9195
0,003	0	14,9938	8,4246
0,005	188,1259476	10,5694	6,6585
Czas $t_{43^\circ\text{C}}$ h			
0,001	0	60,5381	25,8389
0,003	0	29,9876	16,8492
0,005	376,2519	21,1387	13,3170

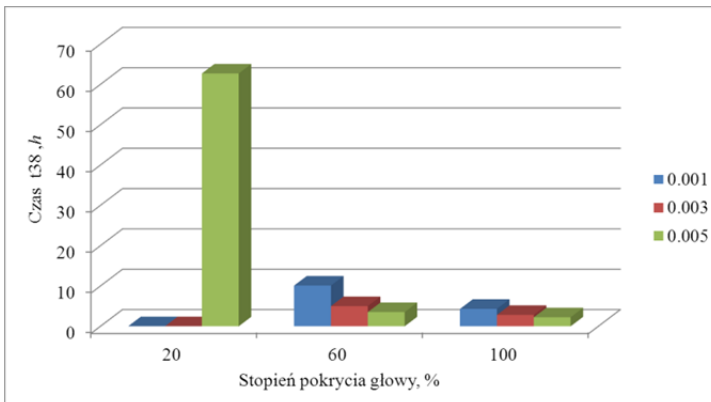
a)



b)



c)



Rys. 55. Wizualizacje: a) nadwyżek ciepła w organizmie noworodka, b) przyrostu temperatury, c) czasu osiągnięcia temperatury  $38^{\circ}C$  przez organizm,  $t_{38^{\circ}C}$ , dla specjalnego ubioru medycznego w postaci folii w funkcji jej grubości

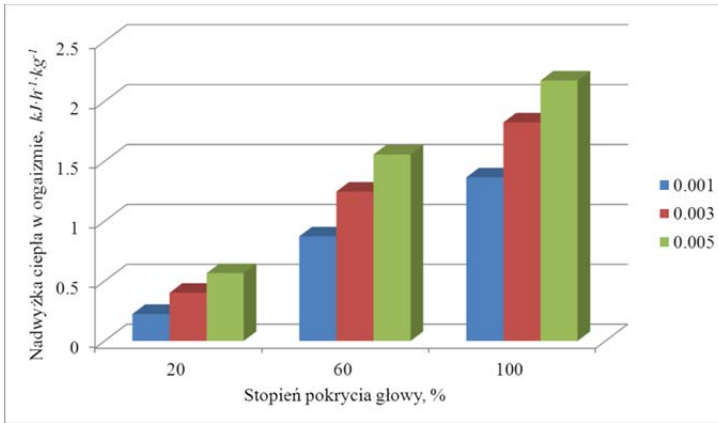
Źródło: opracowanie własne.

Wyniki tych symulacji numerycznych zostały przedstawione w tabeli 45 dla specjalnego ubioru medycznego w postaci folii (współczynnik  $F_{cl} = 0,98$ ) i tabeli 46 dla ubrania dwuwarstwowego – folia połączona z dzianiną ( $F_{cl} = 0,86$ ). Odpowiednie wizualizacje dla nadwyżek ciepła w organizmie, przyrostu temperatury i czasu osiągnięcia przez organizm temperatury  $t_{38^{\circ}\text{C}}$  (czasu najbardziej newralgicznego z punktu widzenia samoregulacji bilansu ciepła) zostały przedstawione na rysunku 55 dla tabeli 45 oraz rysunku 56 dla tabeli 46.

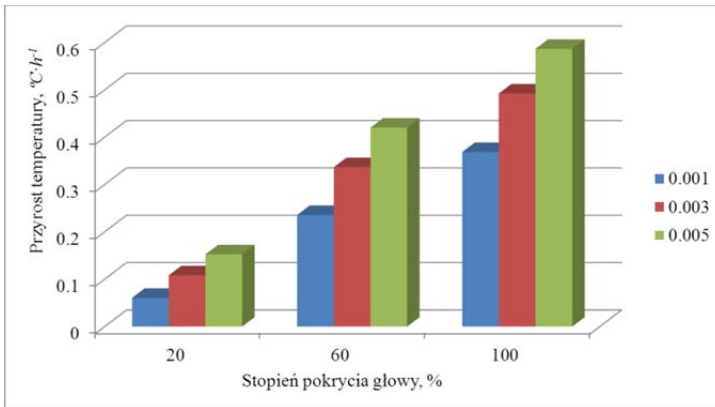
Tabela 46. Nadwyżka ciepła w organizmie, przyrost temperatury, czasy charakterystyczne dla współczynnika przepuszczalności promieniowania cieplnego  $F_{cl} = 0,86$

Grubość czepka, $m$	Nadwyżka ciepła w organizmie, $\text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$		
	Udział procentowy okrycia głowy przez czepkę		
	20%	60%	100%
0,001	0,2251	0,8734	1,3657
0,003	0,4016	1,2469	1,8241
0,005	0,5657	1,5567	2,1735
Przyrost temperatury $^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$			
0,001	0,0608	0,2358	0,3687
0,003	0,1084	0,3367	0,4925
0,005	0,1527	0,4203	0,5868
Czas $t_{38^{\circ}\text{C}}$ h			
0,001	16,4365	4,2359	2,7087
0,003	9,2123	2,9669	2,0281
0,005	6,5396	2,3764	1,7021
Czas $t_{40^{\circ}\text{C}}$ h			
0,001	49,3094	12,7076	8,1262
0,003	27,6368	8,9007	6,0844
0,005	19,6188	7,1292	5,1062
Czas $t_{43^{\circ}\text{C}}$ h			
0,001	98,6187	25,4152	16,2524
0,003	55,2737	17,8015	12,1687
0,005	39,2375	14,2583	10,2124

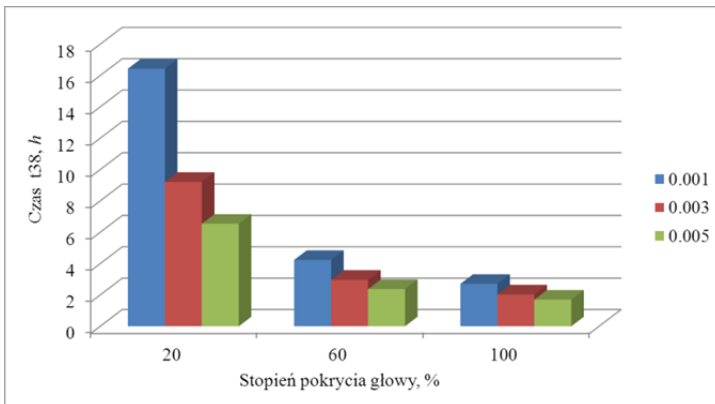
a)



b)



c)



Rys. 56. Wizualizacje: a) nadwyżek ciepła w organizmie noworodka, b) przyrostu temperatury, c) czasu osiągnięcia temperatury  $38^{\circ}C$  przez organizm,  $t_{38^{\circ}C}$ , dla specjalnego ubioru dwu warstwowego – folia połączona z dzianiną w funkcji jej grubości

Źródło: opracowanie własne.

Jak wynika z powyższych obliczeń, możliwe jest sterowanie gospodarką cieplną organizmu noworodka w szerokim zakresie za pomocą trzech podstawowych parametrów: okrycia głowy czepkiem, grubością materiału czepka oraz materiałem ubioru pozostałych części ciała. W przypadku specjalnego ubioru medycznego (współczynnika przepuszczalności promieniowania cieplnego  $F_{cl} = 0,98$ ) istnieje możliwość wystąpienia schłodzenia organizmu dla niewielkich grubości czepka i minimalnego okrycia głowy. W pozostałych przypadkach jest nadwyżka metabolizmu nad stratami ciepła, co może prowadzić do przegrzania. Dlatego duże znaczenie mają czasy charakterystyczne osiągania kolejnych temperatur  $t_{38^{\circ}\text{C}}$ ;  $t_{40^{\circ}\text{C}}$ ;  $t_{43^{\circ}\text{C}}$ . Dla układu statycznego (stały metabolizm) czasy te są znaczne, co przy dozorze noworodka nie powoduje problemów związanych z hipertermią. Można też stwierdzić, że czasy charakterystyczne są bardziej wrażliwe na stopień okrycia głowy przez czepkę niż zmianę grubości materiału w znacznym zakresie.

Jako kolejny rozważany był drugi przypadek, tj. zmiana metabolizmu organizmu noworodka w czasie. Jest ona zależna od temperatury ciała, począwszy od  $37^{\circ}\text{C}$ , do  $38^{\circ}\text{C}$  (granica ryzyka samoregulacji bilansu cieplnego), przez  $40^{\circ}\text{C}$  i  $43^{\circ}\text{C}$  (próg zagrożenia śmiercią). Z uwagi na znaczenie pierwszego zakresu temperatur ( $37^{\circ}\text{C}$  do  $38^{\circ}\text{C}$ ) wzięto pod uwagę więcej punktów obliczeniowych. Posługując się zależnością (160), można określić rozkład metabolizmu. Wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 47.

Tabela 47. Rozkład metabolizmu organizmu noworodka

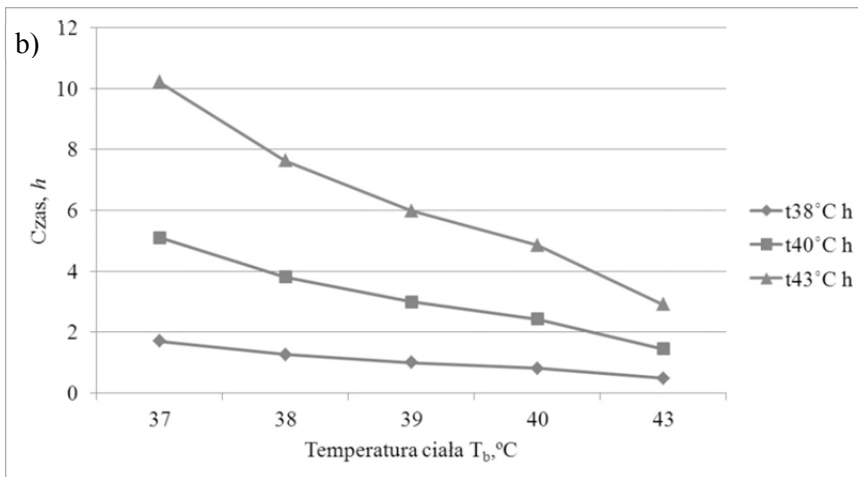
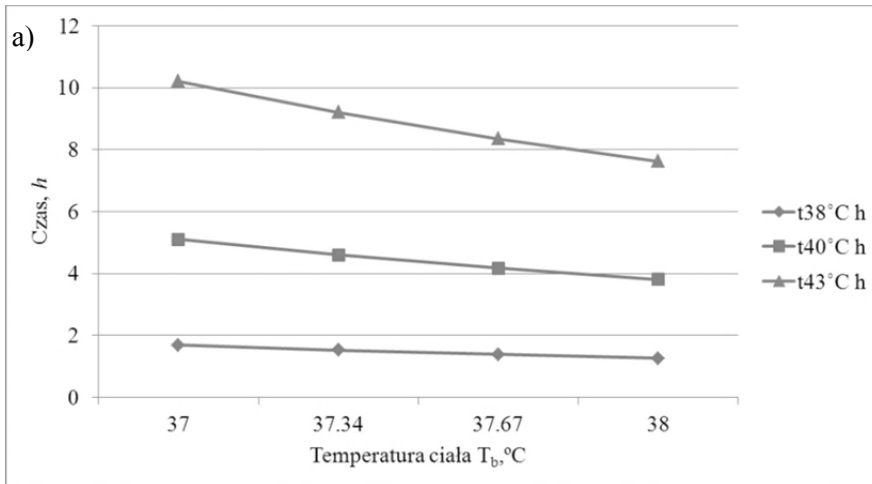
$T_b, ^{\circ}\text{C}$	37,00	37,33	37,67	38,00	39,00	40,00	43,00
$M, \text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	8,50	8,74	8,99	9,24	10,04	10,90	13,98

Jak wynika z tego zestawienia, próg ostrzegawczy jest osiągany po wzroście metabolizmu o około 2,79% w stosunku do wartości początkowej, zaś kolejne progi odpowiednio po wzroście o 28,22% i 64,40% do wartości początkowej. Dla wzrostu metabolizmu najbardziej niekorzystny przypadek występuje, gdy ubiór charakteryzuje się najmniejszą izolacyjnością cieplną. Ma to miejsce dla ubioru dwuwarstwowego – folia połączona z dzianiną (współczynnik przepuszczalności promieniowania cieplnego  $F_{cl} = 0,86$ ), maksymalnej grubości materiału czepka (5 mm) oraz maksymalnego stopnia okrycia głowy (100%). Zakłada się przy tym, że mimo wzrostu metabolizmu temperatura skóry noworodka pozostaje stała. Uzyskane czasy charakterystyczne są przedstawione w tabeli 48 i na rysunku 57.

Tabela 48. Nadwyżka ciepła w organizmie, przyrost temperatury, czasy charakterystyczne dla współczynnika przepuszczalności promieniowania cieplnego  $F_{cl} = 0,86$ , grubości czepka 5 mm i okryciu głowy w 100%

$T_b, ^{\circ}\text{C}$	37,00	37,34	37,67	38,00	39,00	40,00	43,00
$S, \text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$	8,5053	8,7434	8,9883	9,2400	10,0382	10,9054	13,9827
$t_{38^{\circ}\text{C}} \text{ h}$	1,6972	1,5296	1,3886	1,2684	0,9953	0,8066	0,4821
$t_{40^{\circ}\text{C}} \text{ h}$	5,1062	4,6020	4,1778	3,8162	2,9943	2,4266	1,4506
$t_{43^{\circ}\text{C}} \text{ h}$	10,2124	9,2039	8,3555	7,6324	5,9887	4,8532	2,9012





Rys. 57. Wizualizacja czasów charakterystycznych dla współczynnika przepuszczalności promieniowania ciepłego ubioru  $F_{cl} = 0,86$ , grubości czepka  $0,005\text{ m}$  i okrycia głowy w 100%: a) zakres  $(37-38)^\circ\text{C}$ , b) zakres  $(37-43)^\circ\text{C}$

Źródło: opracowanie własne.

Wystąpiło znaczne skrócenie czasów charakterystycznych osiągnięcia kolejnych temperatur  $t_{38^\circ\text{C}}$ ;  $t_{40^\circ\text{C}}$ ;  $t_{43^\circ\text{C}}$ . Przebiegów tych czasów nie można opisać prostą zależnością funkcyjną, są one zmienne podwójnie potęgowe (funkcja potęgowa momentu i odwrotność wyrażenia nadwyżki ciepła w organizmie). Rysunek 57 a stanowi rozwinięcie rysunku 57b, ponieważ dotyczy najbardziej newralgicznego zakresu temperatur noworodka, tj. osiągnięcia progu ostrzegawczego  $38^\circ\text{C}$ .

#### 2.4.4. Wnioski wynikające z modelu transportu masy i ciepła dla noworodka

Przedstawione rozważania stanowią podstawę do sformułowania szeregu wniosków. Przedstawione symulacje numeryczne stanowią tylko przybliżenie rzeczywistości. Istnieje szereg powodów to potwierdzających:

- zdecydowanie osobniczy charakter gospodarki cieplnej organizmu,
- dane wejściowe są opatrzone dość dużymi tolerancjami, rozrzut podawanych wielkości jest znaczny,
- część zależności ma charakter empiryczny, zostały określone na znacznej, ale skończonej liczbowo próbie noworodków,
- przeprowadzona analiza zawiera także pewne elementy upraszczające, np. utrzymywanie stałej temperatury skóry przy wzroście metabolizmu, przyjęcie niektórych współczynników itp.

Dlatego uzyskiwane wyniki należy traktować tylko jako przybliżone, ale reprezentują one opis zachodzących zjawisk z racji przyjęcia pewnych założeń upraszczających model fizyczny. Podstawowe źródła pomocne w opracowaniu zagadnienia to w sensie ogólnym norma PN-EN ISO 7933 [11], szczegółowym – praca Agourram, Bach, Tourneux, Krim, Delnaud, Libert [10]. Pierwsza pozycja literaturowa zawiera sformułowanie bilansu ciepła, określenie metabolizmu, składników strat ciepła. Druga podaje dokładne określenia poszczególnych składników strat ciepła dla noworodków oraz dane wejściowe. Przedstawiona analiza opiera się na obu tych źródłach, jednak obliczenia i ich dalsza analiza są oryginalne.

Określenie wydatku metabolizmu w czasie i oporów ciepła poszczególnych części ciała umożliwia sformułowanie bilansu ciepła ciała noworodka. Jeśli metabolizm jest większy niż ciepło odprowadzane na zewnątrz, występuje hipertermia (przegrzanie ciała). W przeciwnym przypadku niedobór ciepła powoduje hipotermię (wyziębienie organizmu). Dla określenia stopnia niebezpieczeństwa przy hipertermii oblicza się czasy osiągnięcia umownych temperatur ciała, wyrażone związkami empirycznymi, jak i przyrost temperatury w czasie. Największe znaczenie ma czas  $t_{38^{\circ}\text{C}}$  osiągnięcia temperatury ciała  $38^{\circ}\text{C}$ , granicy ryzyka samoregulacji bilansu cieplnego, chociaż znaczenie mają też czasy prognozy śmiertelności  $t_{40^{\circ}\text{C}}$ ;  $t_{43^{\circ}\text{C}}$ . W przypadku hipotermii określa się tylko spadek temperatury w czasie, nie zostały przyjęte żadne temperatury charakterystyczne.

Zasadnicze znaczenie ma określenie wydatków ciepła poszczególnych części ciała noworodka. Najbardziej newralgiczna część pod tym względem to głowa, przez którą jest odprowadzane najwięcej ciepła, pozostałe części ciała mają mniejsze znaczenie. Istnieją duże możliwości regulacji bilansu ciepła przez ingerencję w rodzaj, grubość materiału i stopień okrycia głowy. Ciepło odprowadzane na zewnątrz jest najbardziej wrażliwe na zmianę stopnia okrycia głowy, w mniejszym stopniu na grubość materiału czepka. Znaczna wrażliwość występuje także na materiał okrycia całego ciała, czyli współczynnik oporu

ciepła. Dzięki zmianom tych parametrów można znacznie opóźnić wystąpienie przegrzania organizmu (hipertermii).

Przedstawiona analiza stanowi zamkniętą całość. Istnieje jednak możliwość dalszego jej rozszerzenia na inne materiały i sposoby opisu. Celem jest uzyskanie takich wartości parametrów transportu, które pozwolą na uzyskanie optymalnego wydatku ciepła w ciele noworodka. Dla zapewnienia uniwersalności analizy należy też w miarę możliwości wprowadzać opisy za pomocą związków nieempirycznych, obowiązujących uniwersalnie.

Wprowadzony model bilansu ciepła ma charakter globalny, ponieważ opisuje wymianę ciepła i jej parametry dla wszystkich części ciała jako sumę wydatków poszczególnych fragmentów ciała oraz całościowy metabolizm organizmu. Brak jest w nim ujęcia lokalnego, czyli opisu wymiany ciepła na styku część/fragment ciała – ubiór – otoczenie. Modelowanie zjawisk tam zachodzących następuje za pomocą opisu rodzajów transportu z podaniem odpowiednich współczynników lub związków je opisujących, najczęściej empirycznych. Dlatego należy dążyć do wprowadzenia, tam gdzie jest to możliwe i konieczne, opisu lokalnego zachowania tego systemu w skali mikro. Umożliwi to określenie pól zmiennych stanu w skali lokalnej, nie tylko globalnej. Dotyczy to zarówno całych części ciała, jak i poszczególnych ich fragmentów. Umożliwi również wizualizację otrzymanych pól stanu, co poszerzy możliwości analizy i interpretacji otrzymanych wyników. Model lokalny opisuje problem za pomocą równań różniczkowych drugiego rzędu transportu ciepła i masy (wilgoci). Daje to więc możliwość pełnego opisu sprzężonego transportu ciepła i masy, czyli określenia stężenia wilgoci w materiale. Powyższe stwierdzenia wskazują, że problem opisu bilansu ciepłnego ciała noworodka ma możliwości dalszego rozwoju.

## **2.5. Opracowanie założeń konstrukcyjnych i wykonanie prototypów ubiorów ochronnych dla niemowląt przedwcześnie urodzonych w dwóch fazach ich życia przed i po rozwinięciu warstwy rogowej skóry**

Dla potrzeb wykonania ubiorów ochronnych dla noworodków urodzonych przedwcześnie zaprojektowano i wytworzono następujące grupy dzianin: dzianiny dwuwarstwowe, dzianiny lewoprawe „gładkie”, dzianiny pluszowe.

### **2.5.1. Dzianiny dwuwarstwowe**

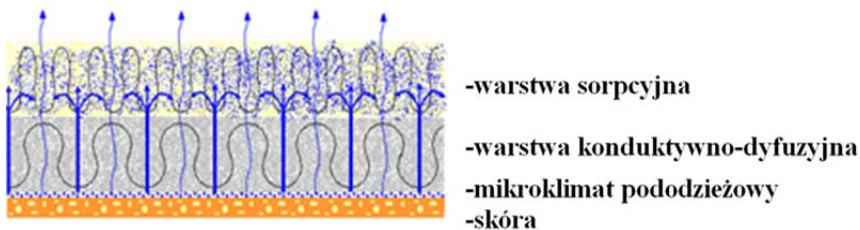
Analiza budowy wyrobów dzianych przeznaczonych na ubiory dla niemowlaków wykazała, iż są to wyroby wykonane z przędzy bawełnianych. Stosowane obecnie dzianiny bawełniane na odzież ochronną dla wcześniaków mogą być przyczyną dyskomfortu termicznego, gdyż wchłonięta z ciała wcześniaka i z otoczenia woda, paruje, obniżając temperaturę ciała. Ponadto zawartość wilgoci obniża izolacyjność cieplną dzianiny z powodu wzrostu współczynnika przenikania ciepła. Dyskomfort ten zwiększa się przy przenoszeniu wcześniaka z inkubatora na zewnątrz, gdzie panuje mniejsza wartość temperatury otoczenia.

Opinie przedstawiające naturalne włókna jako szczególnie predestynowane do wytwarzania wyrobów dla niemowlaków mogą być podważane z następujących przyczyn:

- dzianiny bawełniane nie stanowią naturalnej bariery przed nadmiernym parowaniem wilgoci, co nie chroni dziecka przedwcześnie urodzonego przed utratą płynów fizjologicznych,
- poprzez zbyt dużą sorpcję wilgoci – jak wyżej wspomniano – zostaje zachwiana izolacyjność cieplna wyrobu, co w niesprzyjających warunkach, w których organizm sam produkuje niewiele ciepła, może powodować hipotermię.

Dlatego też konstrukcja dzianin przeznaczona na odzież dla noworodków powinna być zróżnicowana w zależności od fazy rozwoju organizmu. W przypadku noworodków przedwcześnie urodzonych należy stosować konstrukcję dzianiny o właściwościach blokujących przepływ strumienia wilgoci i charakteryzujących się dużą wartością izolacyjności cieplnej. W przypadku noworodków z wykształconą w pełni strukturą skóry, dzianiny powinny zagwarantować odpowiedni komfort użytkowania, w tym zdolność do odprowadzania wilgoci na zewnątrz, tak aby utrzymywać skórę noworodka w stanie suchym bez narażania jej na występowanie ognisk zapalnych powodowanych rozwojem różnego rodzaju patogenów. Zapewnienie wyrobom dzianym właściwości eliminujących wyżej wymienione niekorzystne zjawiska, można uzyskać poprzez dwuwarstwową konstrukcję dzianiny i zastosowanie surowców o odmiennym powinowactwie do wilgoci. W typowej dwuwarstwowej budowie dzianin o wysokich walorach biofizycznych [112-120] (rysunek 58) wyodrębnia się:

- warstwę dzianiny wykonanej z nitek konduktywno-dyfuzyjnych, która przylega bezpośrednio do ciała. Zadaniem tej warstwy jest odprowadzanie i transport wilgoci od ciała, zarówno w postaci fazy ciekłej, jak i lotnej;
- warstwę dzianiny wykonanej z nitek sorpcyjnych, która wyłączona jest z bezpośredniego kontaktu ze skórą. Zadaniem tej warstwy jest utrzymywanie wilgoci z dala od ciała i jej odparowanie do otoczenia.



Rys. 58. Poglądowy model dzianiny o wysokich walorach biofizycznych

Źródło: opracowanie własne.

Aby spełnić wymagania dwuwarstwowej konstrukcji dzianiny zaproponowano rodzaje nitki o właściwościach kondukcyjno-dyfuzyjnych przedstawione w tabeli 49.

Tabela 49. Rodzaje nitki przyjęte na warstwę kondukcyjno-dyfuzyjną

Lp.	Rodzaje nitki	Oznaczenie
1	Polipropylen 100%, 84 dtex f 25x2	PP 84 dtex /f 25x2
2	Poliamid 66 100%, 78/68, spętłony, liczba łączy D = 2	PA66 78 dtex/f68x2
3	Poliamid 66 100%, 140 dtex f 102, (Taslan)	PA66 140dtex/f102 (TASLAN)
4	Poliester 100%, 167 dtex f 96, (Torlen)	PES 167 dtex/f96 (TORLEN)
5	Poliester 100%, mikrowłókna, 150 dtex f 256 (Trewira)	PES TREVIRA 150 dtex/f256x1

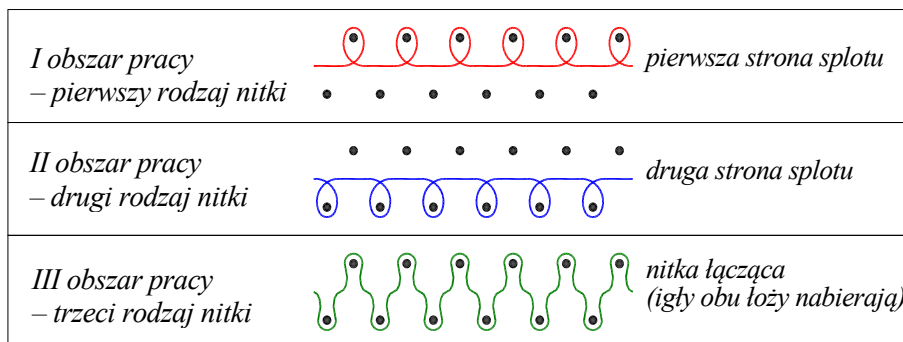
Jako surowiec o właściwościach sorpcyjnych zaproponowano nitki opisane w tabeli 50.

Tabela 50. Rodzaje nitki przyjęte na warstwę sorpcyjną

Lp.	Rodzaje nitki	Oznaczenie
1	Bawełna konwencjonalna 100%, 20 tex, $\alpha_m = 90$	Baw 20 tex, $\alpha_m = 90$
2	Bawełna konwencjonalna 100%, 20 tex, $\alpha_m = 100$	Baw 20 tex, $\alpha_m = 100$
3	Bawełna konwencjonalna 100%, 20 tex, $\alpha_m = 121$	Baw 20 tex, $\alpha_m = 121$
4	Bawełna organiczna, czesana 100%, 20 tex, $\alpha_m = 107$	Baw 20 tex, $\alpha_m = 107$
5	Bawełna konwencjonalna, czesana 100%, 20 tex, $\alpha_m = 109$	Baw 20 tex, $\alpha = 109$
6	Bawełna 24 tex	Baw 24 tex
7	Bawełna konwencjonalna, czesana, bielona 100%, 20 tex, $\alpha_m = 111$	Baw Biel 20 tex
8	Bawełna konwencjonalna, czesana, bielona 100%, 15 tex, $\alpha_m = 100$	Baw Biel 15 tex
9	Włókna z drzewnej masy celulozowej 100%, 20 tex, $\alpha_m = 110$	Wiskoza 20 tex
10	Włókna z bambusowej masy celulozowej 100%, 20 tex, $\alpha_m = 129$	Bambus 20 tex
11	Włókna bielone z bambusowej masy celulozowej 100%, 20 tex, $\alpha_m = 129$	Bambus biały 20 tex
12	Bawełna konwencjonalna 100%, 8 tex, $\alpha_m = 90$	Baw 8 tex

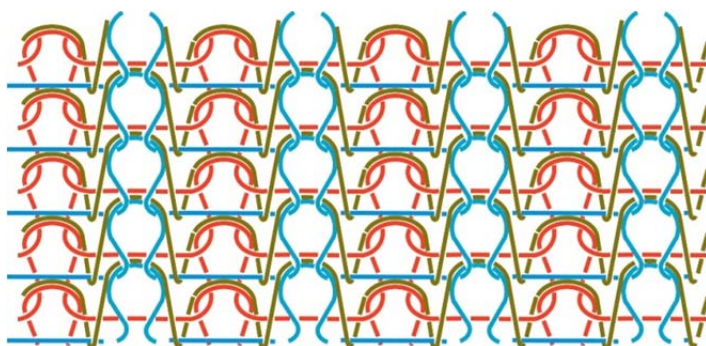
Z wyżej wymienionych surowców wykonano dzianiny dwuwarstwowe, które zbudowane są z dwóch splotów lewoprawych łączonych techniką nabraniową, poliamidową nitką teksturowaną o niskiej masie liniowej PA 66 22 dtex f7. Algorytm tworzenia dzianin dwuwarstwowych przedstawiono na rysunku 59 –

splot, w którym jedną stronę splotu tworzą oczka lewe, wytwarzane z jednego rodzaju nitki (czerwone), drugą natomiast oczka prawe, wytwarzane z drugiego rodzaju nitki (niebieskie). Połączenie dwóch warstw splotu uzyskuje się poprzez połączenie dwóch warstw splotu pętlami nabrań.

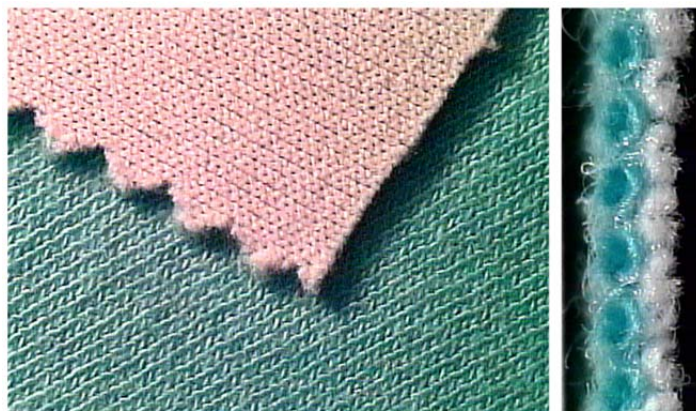


Rys. 59. Algorytm wykonania splotu dwuwarstwowego na dwułożyskowej szydełkarce  
Źródło: opracowanie własne.

Przedstawiona na rysunku 59 dzianina dwuwarstwowa zbudowana jest z dwóch odrębnych splotów lewopranych, a przekazywanie wilgoci z jednej warstwy do drugiej odbywa się głównie poprzez kontakt powierzchniowy, gdyż pośrednia nitka łącząca obie warstwy dzianiny ma niską masę liniową (22 dtex) i właściwości hydrofobowe. Należy zaznaczyć, iż nitka łącząca nie formuje oczek, a jej udział procentowy nie przekracza 5%. W stanie swobodnym oczka składowych splotów lewopranych każdego ze splotów składowych stykają się ze sobą tworząc dwie gładkie warstwy dzianiny (rysunki 60-61). W celach porównawczych zaprojektowano i wykonano także dzianiny dwuwarstwowe, jednorodne surowcowo, gdzie obie warstwy wykonane były z tych samych surowców. W tabeli 51 są to warianty od 13-19, składające się z nitki bawełnianych i wariant 28 wykonany z dwóch warstw z nitki wiskozowej.



Rys. 60. Budowa dzianiny dwuwarstwowowej  
Źródło: opracowanie własne.



Rys. 61. Budowa dzianiny dwuwarstwowej

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 51. Zestawienie rządkowych splotów dwuwarstwowych „gładkich”

Wariant	Zamek nr	Rodzaj warstwy	Rodzaj surowca
1	I	warstwa zewnętrzna	BawBiel 20 tex
	II	warstwa wewnętrzna	PP 84 dtex/f25x2
	III	nitka łącząca	PA66 22 dtex/f7
2	I	warstwa zewnętrzna	Baw 20 tex, $\alpha_m = 121$
	II	warstwa wewnętrzna	PP 84 dtex/f25x2
	III	nitka łącząca	PA66 22 dtex/f7
3	I	warstwa zewnętrzna	Baw 20 tex, $\alpha_m = 107$
	II	warstwa wewnętrzna	PP 84 dtex/f25x2
	III	nitka łącząca	PA66 22 dtex/f7
4	I	warstwa zewnętrzna	Baw 20 tex, $\alpha_m = 121$
	II	warstwa wewnętrzna	PES 167 dtex/f96
	III	nitka łącząca	PA66 22 dtex/f7
5	I	warstwa zewnętrzna	Baw 20 tex, $\alpha_m = 109$
	II	warstwa wewnętrzna	PP 84 dtex/f25x2
	III	nitka łącząca	PA66 22 dtex/f7
6	I	warstwa zewnętrzna	Baw 20 tex, $\alpha_m = 90$
	II	warstwa wewnętrzna	PP 84 dtex/f25x2
	III	nitka łącząca	PA66 22 dtex/f7
7	I	warstwa zewnętrzna	Baw 20 tex, $\alpha_m = 100$
	II	warstwa wewnętrzna	PP 84 dtex/f25x2
	III	nitka łącząca	PA66 22 dtex/f7
8	I	warstwa zewnętrzna	Baw 24 tex
	II	warstwa wewnętrzna	PP 84 dtex/f25x2
	III	nitka łącząca	PA66 22 dtex/f7
9	I	warstwa zewnętrzna	Baw 24 tex
	II	warstwa wewnętrzna	PES 167 dtex/f96
	III	nitka łącząca	PA66 22 dtex/f7

10	I II III	warstwa zewnętrzna warstwa wewnętrzna nitka łącząca	Baw 20 tex, $\alpha_m = 121$ PES 167 dtex/f96 PA66 22 dtex/f7
11	I II III	warstwa zewnętrzna warstwa wewnętrzna nitka łącząca	Baw 20 tex, $\alpha_m = 121$ PA6678 dtex/f68x2 PA66 22 dtex/f7
12	I II III	warstwa zewnętrzna warstwa wewnętrzna nitka łącząca	BawBiel 20 tex PA66 140 dtex/f102 (TASLAN)/ PA 66 22 dtex/f7
13	I II III	warstwa zewnętrzna warstwa wewnętrzna nitka łącząca	Baw 24 tex Baw 24 tex PA66 22 dtex/f7
14	I II III	warstwa zewnętrzna warstwa wewnętrzna nitka łącząca	BawBiel 20 tex BawBiel 15 tex PA66 22 dtex/f7
15	I II III	warstwa zewnętrzna warstwa wewnętrzna nitka łącząca	Baw 20 tex, $\alpha = 109$ Baw 20 tex, $\alpha = 90$ PA66 22 dtex/f7
16	I II III	warstwa zewnętrzna warstwa wewnętrzna nitka łącząca	Baw 20 tex, $\alpha_m = 109$ Baw 20 tex, $\alpha_m = 100$ PA66 22 dtex/f7
17	I II III	warstwa zewnętrzna warstwa wewnętrzna nitka łącząca	Baw 20 tex, $\alpha_m = 109$ Baw 20 tex, $\alpha_m = 109$ PA66 22 dtex/f7
18	I II III	warstwa zewnętrzna warstwa wewnętrzna nitka łącząca	Baw 20 tex, $\alpha_m = 100$ Baw 20 tex, $\alpha_m = 100$ PA66 22 dtex/f7
19	I II III	warstwa zewnętrzna warstwa wewnętrzna nitka łącząca	Baw 20 tex, $\alpha_m = 90$ Baw 20 tex, $\alpha_m = 90$ PA66 22 dtex/f7
20	I II III	warstwa zewnętrzna warstwa wewnętrzna nitka łącząca	Baw 20 tex, $\alpha_m = 121$ PES TREVIRA 150 dtex/f256x1 PA66 22 dtex/f7
21	I II III	warstwa zewnętrzna warstwa wewnętrzna nitka łącząca	Baw Biel 20 tex PES TREVIRA 150 dtex/f256x1 PA66 22 dtex/f7
22	I II III	warstwa zewnętrzna warstwa wewnętrzna nitka łącząca	Bambus biały 20 tex PA 140 dtex/f102 TASLAN PA66 22 dtex/f7
23	I II III	warstwa zewnętrzna warstwa wewnętrzna nitka łącząca	Bambus 20 tex PP 84 dtex/f25x2 PA66 22 dtex/f7
24	I II III	warstwa zewnętrzna warstwa wewnętrzna nitka łącząca	Bambus biały 20 tex PP 84 dtex/f25x2 PA66 22 dtex/f7



25	I II III	warstwa zewnętrzna warstwa wewnętrzna nitka łącząca	Bambus biały 20 tex PE 167 dtex/f96x2 PA66 22 dtex/f7
26	I II III	warstwa zewnętrzna warstwa wewnętrzna nitka łącząca	Bambus biały 20 tex PES TREVIRA 150 dtex/f256x1 PA66 22 dtex/f7
27	I II III	warstwa zewnętrzna warstwa wewnętrzna nitka łącząca	Wiskoza 20 tex PP 84 dtex/f25x2 PA66 22 dtex/f7
28	I II III	warstwa zewnętrzna warstwa wewnętrzna nitka łącząca	Wiskoza 20 tex Wiskoza 20 tex PA66 22 dtex/f7
29	I II III	warstwa zewnętrzna warstwa wewnętrzna nitka łącząca	Wiskoza 20 tex PES 167 dtex/f96 PA66 22 dtex/f7

Dzianiny dwuwarstwowe wykonane zostały na cylindrycznej szydełkarce dwułożyskowej firmy Mayer & Cie (rysunek 62).



Rys. 62. Cylindryczna szydełkarka dwułożyskowa firmy Mayer & Cie: typ Ovja 36, numer uiglenia 20 E, liczba zamków  $z = 36$ , liczba igieł  $I = 1872$ , średnica cylindra  $\varphi = 30 \text{ cali}$

Źródło: opracowanie własne.

Przy wytwarzaniu dzianin dwuwarstwowych, wartość napięcia wstępnego nitki wynosiła  $F_0 = 0,1 \text{ cN}\cdot\text{tex}^{-1}$ , a wartość siły odbioru  $F_A = 0,2 \text{ cN}\cdot\text{kolumnienka}^{-1}$ .

## 2.5.2. Dzianiny lewoprawe „gładkie” i pluszowe

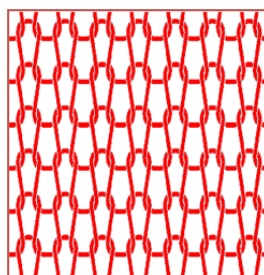
Aby ograniczyć utratę wody wskutek parowania, obecnie noworodki urodzone przedwcześnie owijane są w folię nieprzepuszczającą pary wodnej, która jednak nie zapewnia komfortu termicznego. Ograniczenie utraty wody wskutek parowania, wraz z jednoczesnym zapewnieniem komfortu termicznego, może zapewnić odzież dla dzieci przedwcześnie urodzonych wykonana w postaci tekstylnego układu warstwowego, który zbudowany jest z membrany i z dzianiny. Zadaniem membrany jest ograniczenie parowania ze skóry dziecka, a dzianiny – zapewnienie komfortu termicznego. Dla potrzeb układu warstwowego, wykonano dzianiny lewoprawe gładkie oraz dzianiny pluszowe. Niska wartość masy liniowej zastosowanej przędzy umożliwiła otrzymanie dzianiny o stosunkowo małej wartości sztywności zginania, która połączona z membraną zapewnia dobrą układalność ubioru ochronnego.

Dzianiny lewoprawe wykonane zostały na cylindrycznej szydełkarkie jednołożyskowej firmy Pilotelli NJ o numerze uiglenia 40E (rysunek 63). Budowa dzianiny o splocie lewoprawym została zilustrowana na rysunku 64.



Rys. 63. Cylindryczna szydełkarka jednołożyskowa firmy Pilotelli NJ

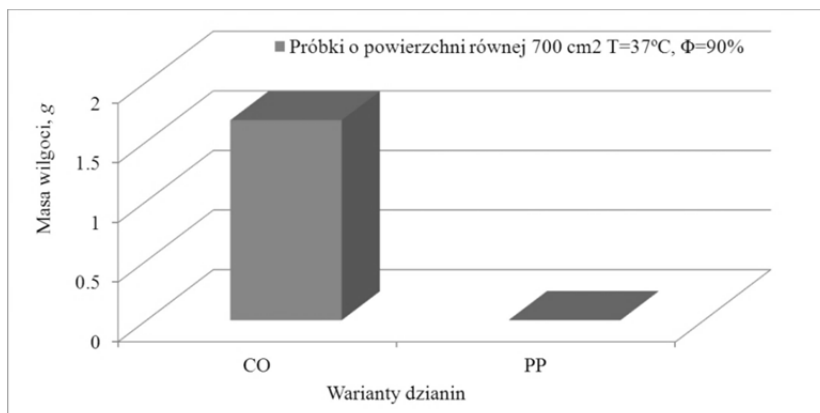
Źródło: opracowanie własne.



Rys. 64. Budowa dzianiny o splocie lewoprawym

Źródło: opracowanie własne.

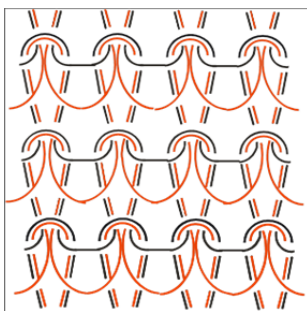
Przy wytwarzaniu dzianiny lewopranej, wartość napięcia wstępnego przędzy wynosiła  $F_0 = 0,1 \text{ cN}\cdot\text{tex}^{-1}$ , a wartość siły odbioru  $F_A = 0,2 \text{ cN}\cdot\text{kolumnienka}^{-1}$ . Zwiększenie komfortu termicznego w ubraniu ochronnym w postaci układu warstwowego można uzyskać poprzez zastosowanie w warstwie zewnętrznej dzianiny pluszowej z przędzy polipropylenowej, gdyż dzianiny polipropylenowe charakteryzują się minimalną chłonnością wilgoci z otoczenia. Przeprowadzone badania zawartości wilgoci dla dwóch rodzajów dzianin o jednakowej powierzchni równej  $700 \text{ cm}^2$  umieszczonej na okres 4 godzin w komorze klimatyzacyjnej, w której wilgotność względna wynosiła 90%, a wartość temperatury równa była  $30^\circ\text{C}$  wykazała, iż dzianina polipropylenowa praktycznie zgromadziła zerową wartość wilgoci (0,003 g), a bawełniana 1,678 g (rysunek 65).



Rys. 65. Porównanie masy wilgoci w próbkach dzianin wykonanych z przędzy bawełnianej 20 tex i przędzy polipropylenowej 84 dtex/f 24x2

Źródło: opracowanie własne.

Dzianina polipropylenowa po wyjęciu z komory klimatyzacyjnej miała „ciepły chwyt” w odróżnieniu od dzianiny bawełnianej. W dalszych badaniach przyjęto, iż warstwa kondukcyjno-dyfuzyjna zostanie utworzona z dzianin o splocie pluszu (rysunek 66). Dzianiny po wykonaniu zostały wykończone i poddane procesowi strzyżenia i drapania.



Rys. 66. Budowa dzianiny o splocie pluszu jednostronnego

Źródło: opracowanie własne.

## 2.6. Charakterystyka wytworzonych płaskich wyrobów włókienniczych przeznaczonych na odzież dla noworodków

Wytworzony materiał badawczy zestawiono w grupy obejmujące dzianiny dwuwarstwowe o zdefiniowanym składzie surowcowym, dzianiny wyjściowe stosowane w produkcji laminatów z membraną oraz zastosowane folie. Przyjęte oznaczenia dla różnego rodzaju dzianin zestawiono w tabelach 52 i 53, nadając im kolejne numery.

Tabela 52. Oznaczenia badanych dzianin o właściwościach konduktywno-dyfuzyjnych i sorpcyjnych

Nr	Nazwa próbki dzianiny, symbol
<b>I Dzianiny bawełniano-polipropylenowe łączone nitką PA66</b>	
1	Dzianina bawełniano-polipropylenowa – nitka łącząca poliamidowa, BawBiel 20 tex PP84/25x2/ PA66 22/7
2	Dzianina bawełniano-polipropylenowa – nitka łącząca poliamidowa, Baw 20 tex PP84/25x2/PA66 22/7
3	Dzianina bawełniano-polipropylenowa – nitka łącząca poliamidowa, Baw 20 tex PP84/25x2/PA66 22/7
4	Dzianina bawełniano-polipropylenowa – nitka łącząca poliamidowa, Baw 24 tex PP84/25x2 /PA66 22/7
5	Dzianina bawełniano-polipropylenowa – nitka łącząca poliamidowa, W3 Baw Czes PP84/25x2/PA66 22/7
6	Dzianina bawełniano-polipropylenowa – nitka łącząca poliamidowa, W1 20 tex 671 skr PP84/25x2/PA66 22/7
7	Dzianina bawełniano-polipropylenowa – nitka łącząca poliamidowa, W2 20 tex PP84/25x2 /PA66 22/7
<b>II Dzianiny bawełniano-poliestrowe łączone nitką PA66</b>	
8	Dzianina bawełniano-poliestrowa – nitka łącząca poliamidowa, Baw 20 tex PES167/96 /PA66 22/7
9	Dzianina bawełniano-poliestrowa – nitka łącząca poliamidowa, BawBiel 20 tex PES167/96/PA66 22/7
10	Dzianina bawełniano-poliestrowa – nitka łącząca poliamidowa, Baw20 tex TREVIRA TYPE511M150 F 256x1/PA 66 22/7
11	Dzianina bawełniano-poliestrowa – nitka łącząca poliamidowa, BawBiel 20 tex TREVIRA TYPE511M150F 256x1/PA66 22/7
12	Dzianina bawełniano-poliestrowa – nitka łącząca poliamidowa, Baw 24 tex PES167/96 /PA66 22/7
<b>III Dzianiny bawełniano-poliamidowe łączone nitką PA66</b>	
13	Dzianina bawełniano-poliamidowa – nitka łącząca poliamidowa, Baw 20 tex PA66 78/68x2 PA66 22/7
14	Dzianina bawełniano-poliamidowa – nitka łącząca poliamidowa, BawBiel 20 tex PA66 140f102MXRD (TASLAN)/PA 66 22/7
<b>IV Dzianiny bambusowo-polipropylenowe łączone nitką PA66</b>	
15	Dzianina bambusowo-polipropylenowa – nitka łącząca poliamidowa, Bambus 20 tex PP84/25x2 /PA66 22/7
16	Dzianina bambusowo-polipropylenowa – nitka łącząca poliamidowa, Bambus20 tex PP84/25x2/PA66 22/7 biały
<b>V Dzianiny bambusowo- poliestrowe łączone nitką PA66</b>	
17	Dzianina bambusowo-poliestrowa – nitka łącząca poliamidowa, Bambus 20 tex PES167/96x2/PA66 22/7
18	Dzianina bambusowo-poliestrowa – nitka łącząca poliamidowa, Bambus 20 tex TREVIRA TYPE511M150F 256x1/PA66 22/7
<b>VI Dzianiny bambusowo-poliamidowe łączone nitką PA66</b>	
19	Dzianina bambusowo-poliamidowa – nitka łącząca poliamidowa, Bambus 20 tex PA140f102MXRD TASLAN PA66 22/7
<b>VII Dzianiny wiskozowo-polipropylenowa łączone nitką PA66</b>	
20	Dzianina wiskozowo-polipropylenowa – nitka łącząca poliamidowa, Wiskoza 20 tex PP 84/25x2/PA66 22/7
<b>VIII Dzianiny wiskozowo-poliestrowe łączone nitką PA66</b>	
21	Dzianina wiskozowo-poliestrowa – nitka łącząca poliamidowa, Wiskoza 20 tex PES 167/96 /PA66 22/7
<b>VIII Dzianiny dwustronne z tego samego surowca</b>	
22	Dzianina wiskozowa dwuwarstwowa – nitka łącząca poliamidowa Wiskoza 20 tex, Wiskoza 20 tex/ PA66 22/7
23	Dzianina bawełniana dwuwarstwowa – nitka łącząca poliamidowa, BawBiel 20 tex BawBiel 15 tex/PA66 22/7
24	Dzianina bawełniana dwuwarstwowa – nitka łącząca poliamidowa, W3 W1/PA66 22/7
25	Dzianina bawełniana dwuwarstwowa – nitka łącząca poliamidowa, W3 W2/PA66 22/7
26	Dzianina bawełniana dwuwarstwowa – nitka łącząca poliamidowa, W3 W3/PA66 22/7
27	Dzianina bawełniana dwuwarstwowa – nitka łącząca poliamidowa, W2 W2/PA66 22/7
28	Dzianina bawełniana dwuwarstwowa – nitka łącząca poliamidowa, W1 W1/PA66 22/7
29	Dzianina bawełniana dwustronna – nitka łącząca poliamidowa, Baw 24 tex Baw 24 tex/PA66 22/7
<b>IX Dzianiny komercyjne zakupione na potrzeby badań</b>	
30	Dzianina komercyjna, 93% wiskoza bambusowa, 7% elastan
31	Dzianina komercyjna, 50% wiskoza modal, 50% bawełna
32	Dzianina komercyjna, 77% wiskoza, 23% poliester
33	Dzianina komercyjna, 46% bawełna, 54% poliester
34	Dzianina komercyjna, 95% bawełna, 5% elastan
35	Dzianina komercyjna, 95% wiskoza, 5% elastan
36	Dzianina komercyjna, 100% bawełna

Tabela 53. Zestaw oznaczeń półproduktów i końcowych płaskich wyrobów włókienniczych stosowanych do produkcji ubrań dla dzieci przedwcześnie urodzonych, wyposażonych w membranę o niskiej przepuszczalności pary wodnej

Nr	Dzianiny i folie użyte do układów warstwowych, symbol
37	Komercyjna folia polietylenowa, Folia VYGON
38	Dzianina bawełniana o niskiej masie powierzchniowej, Bawełna cienka
39	Dzianina bawełniana, Bawełna gruba
40	Dzianina pluszowa, Plusz biały
41	Dzianina pluszowa, Plusz czarny
42	Folia polipropylenowa, Folia PP
43	Folia poliuretanowa, Folia PU
Układy warstwowe	
44	Dzianina pluszowa połączona z folią poliuretanową, Plusz czarny/Folia PU
45	Dzianina pluszowa połączona z folią polipropylenową, Plusz czarny/Folia PP
46	Dzianina pluszowa połączona z folią polipropylenową, Plusz biały/Folia PP
47	Dzianina bawełniana o niskiej masie powierzchniowej połączona z folią poliuretanową, Bawełna cienka/Folia PU
48	Dzianina bawełniana o niskiej masie powierzchniowej połączona z folią polipropylenową, Bawełna cienka/Folia PP
49	Dzianina bawełniana połączona z folią poliuretanową, Bawełna gruba/Folia PU
50	Dzianina bawełniana połączona z folią polipropylenową, Bawełna gruba/Folia PP
51	Dzianina pluszowa połączona z folią poliuretanową i dzianiną bawełnianą o niskiej masie powierzchniowej, Plusz czarny/Folia PU/Bawełna cienka
52	Dzianina pluszowa połączona z folią polipropylenową i dzianiną bawełnianą o niskiej masie powierzchniowej, Plusz czarny/Folia PP/Bawełna cienka
53	Dzianina pluszowa połączona z folią polipropylenową i dzianiną bawełnianą o niskiej masie powierzchniowej, Plusz biały/Folia PP/Bawełna cienka
54	Dzianina pluszowa połączona z folią polipropylenową i dzianiną pluszową, Plusz biały/Folia PP/Plusz biały
55	Dzianina pluszowa połączona z folią polipropylenową i dzianiną pluszową, Plusz czarny/Folia PP/Plusz czarny
56	Dzianina pluszowa połączona z folią polipropylenową i dzianiną pluszową, Plusz czarny/Folia PP/Plusz biały
57	Dzianina pluszowa połączona z folią polipropylenową i dzianiną bawełnianą, Plusz czarny/Folia PP/Bawełna gruba
58	Dzianina pluszowa połączona z folią poliuretanową i dzianiną bawełnianą, Plusz czarny/Folia PU/Bawełna gruba
59	Dzianina pluszowa połączona z folią polipropylenową i dzianiną bawełnianą, Plusz biały/Folia PP/Bawełna gruba

## 2.6.1. Analiza właściwości sensorycznych wytworzonych wariantów dzianin

W rozdziale 1.1 niniejszego opracowania omówiono czynniki wpływające na komfort użytkowania wyrobów włókienniczych. Jedną z grup tych czynników są właściwości mechaniczne płaskich wyrobów włókienniczych decydujące o komforcie sensorycznym. Komfort ten określa się w sposób obiektywny przy użyciu systemu pomiarowego o nazwie Kawabata Evaluation System, w skrócie KES, który szczegółowo został opisany w pracy [30, 121]. System ten został wykorzystany do oceny badanych wariantów płaskich wyrobów włókienniczych przeznaczonych na odzież dla niemowlaków w różnym stadium ich rozwoju. Badaniom poddano wyroby, których opis zestawiono w tabelach 52 i 53 przy użyciu modułów umożliwiających przeprowadzenie analizy odpowiedzi materiału na działanie zróżnicowanych obciążeń, takich jak:

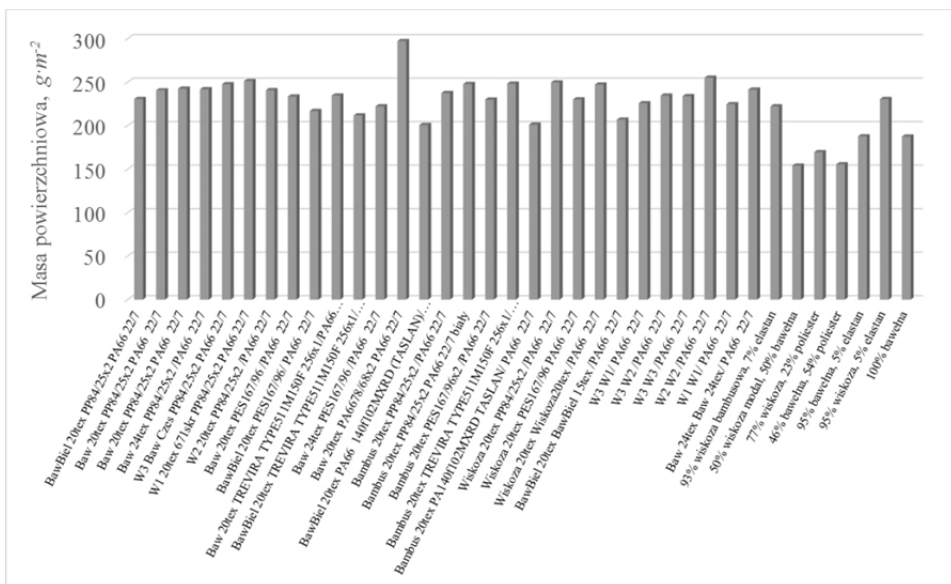
- sił ścinających i rozciągających przy użyciu KES1,
- sił zginających przy użyciu KES2,
- sił ściskających przy użyciu KES3,
- sił tarcia przy użyciu KES4.

Podczas realizacji badań do programu sterującego systemem KES wprowadzono masę powierzchniową w  $mg \cdot cm^{-2}$ . Pomiaru prowadzono zgodnie z metodyką podaną w instrukcji obsługi systemu KES [122]. Uzyskane wyniki przedstawiono w postaci rysunków ilustrujących wybrane wartości parametrów, wpływających na właściwości użytkowe wytworzonych dzianin, takich jak: masy powierzchniowej,  $g \cdot m^{-2}$ , B – sztywności zginania odniesionej do szerokości próbki,  $cN \cdot cm^{-2} \cdot cm^{-1}$  oraz współczynnika tarcia MIU.

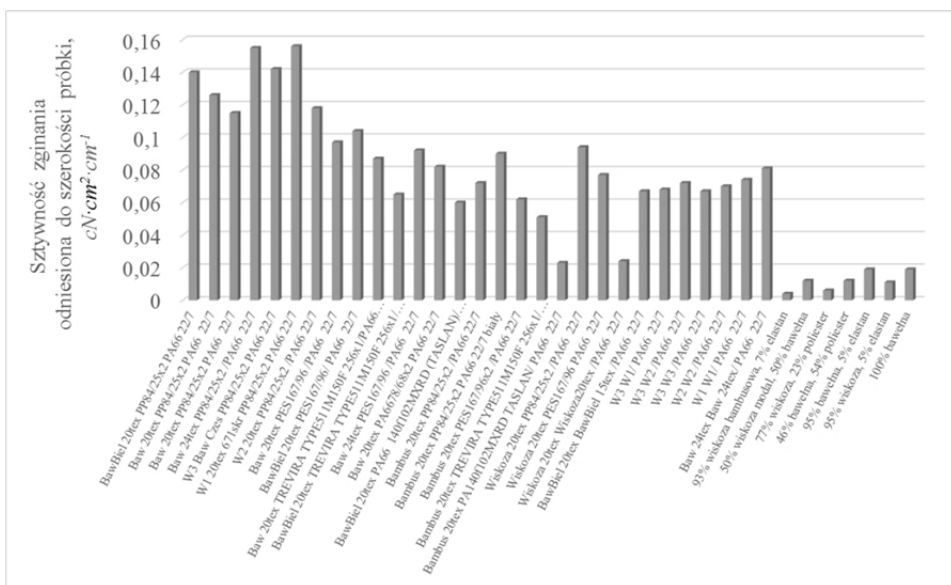
Do wyliczenia THV oraz wartości podstawowych chwytu użyto wzoru KN-402-KT (wzór 163), który jest opisany jako adekwatny dla dzianin przeznaczonych na ubiory męskie zimowe [123]. Dobór tego równania wynikał z wartości mas powierzchniowych i sztywności zginania stosowanych dzianin.

$$Y = C_0 + \sum_{i=1}^{16} C_i \frac{x_i - \bar{x}_i}{\sigma_i}, \quad (163)$$

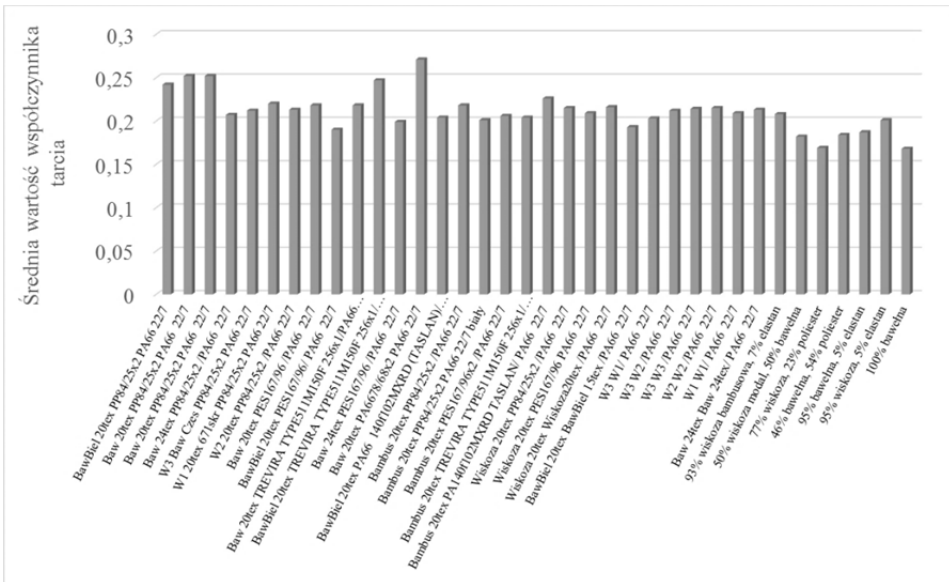
gdzie:  $Y$  – chwyt,  $x_i$  – wartość charakterystyczna dla danego równania lub jego logarytm odczytywany z tabel KN stanowiących stałe [30],  $\bar{x}_i$  – wartość średnia i odchylenie standardowe dla  $i$ -tej wartości charakterystycznej,  $C_0$  – stały współczynnik wprowadzony do programu komputerowego obsługującego system KES. Na rysunkach 67-73 przedstawiono wyniki badań dla dzianin dwuwarstwowych i dzianin komercyjnych, a na rysunkach 74-80 dla dzianin warstwowych z membraną.



Rys. 67. Wyniki badań masy powierzchniowej dzianin z warstwą kondukcyjno-dyfuzyjną i sorpcyjną oraz dzianin komercyjnych  
 Źródło: opracowanie własne.

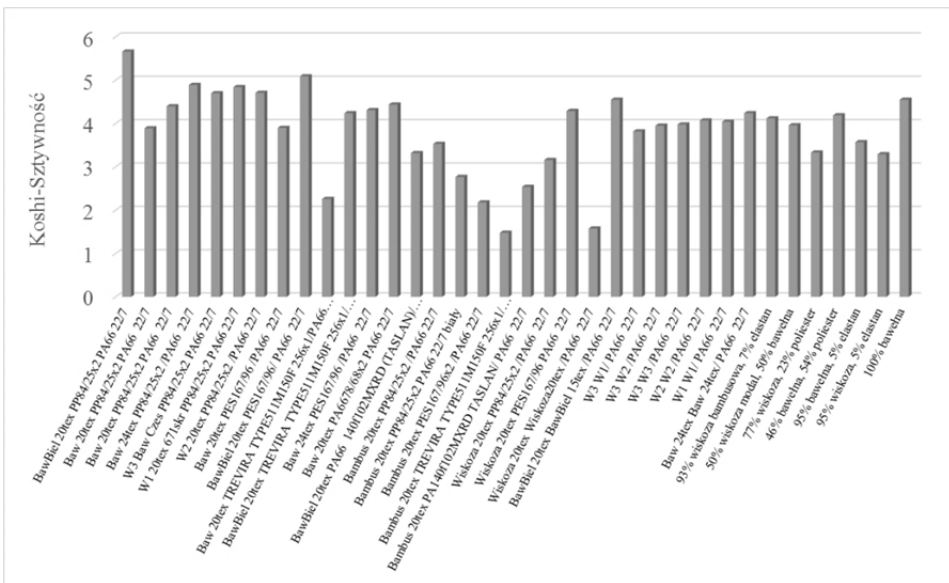


Rys. 68. Wyniki badań sztywności zginania dzianin z warstwą kondukcyjno-dyfuzyjną i sorpcyjną oraz dzianin komercyjnych  
 Źródło: opracowanie własne.



Rys. 69. Wyniki badań współczynnika tarcia dzianin z warstwą kondukcyjno-dyfuzyjną i sorpcyjną oraz dzianin komercyjnych

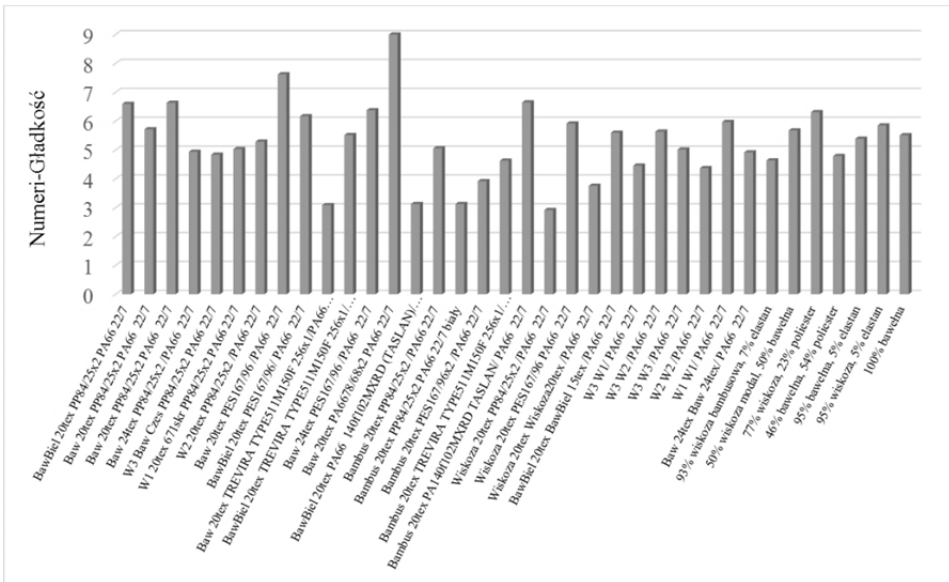
Źródło: opracowanie własne.



Rys. 70. Wyniki badań podstawowej wielkości chwytu KOSHI dzianin z warstwą kondukcyjno-dyfuzyjną i sorpcyjną oraz dzianin komercyjnych

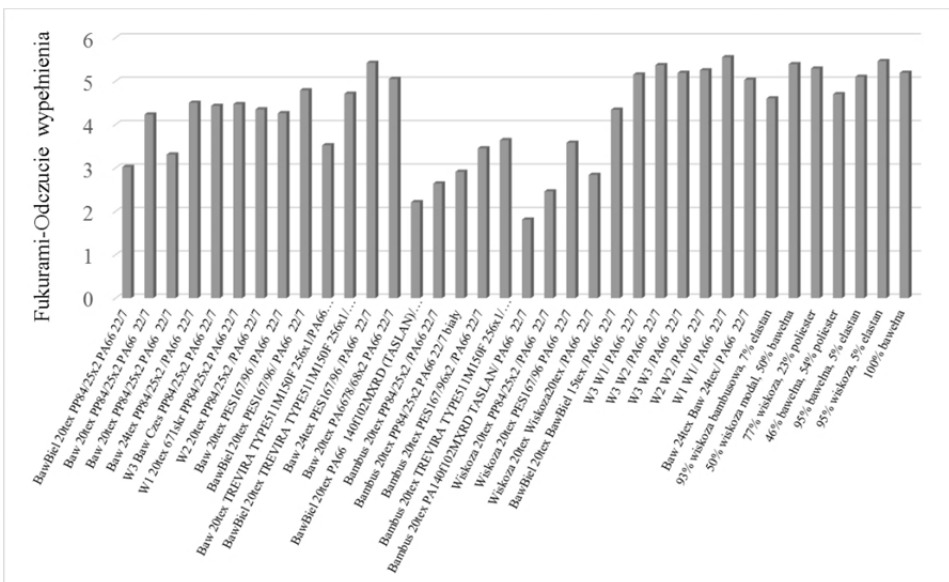
Źródło: opracowanie własne.





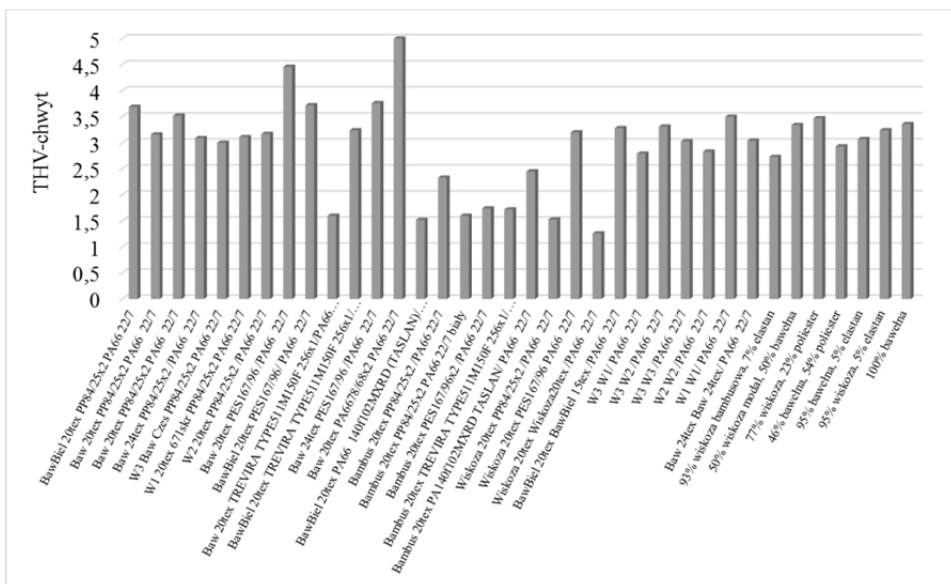
Rys. 71. Wyniki badań podstawowej wielkości chwytu NUMERI dzianin z warstwą konduktywno-dyfuzyjną i sorpcyjną oraz dzianin komercyjnych

Źródło: opracowanie własne.

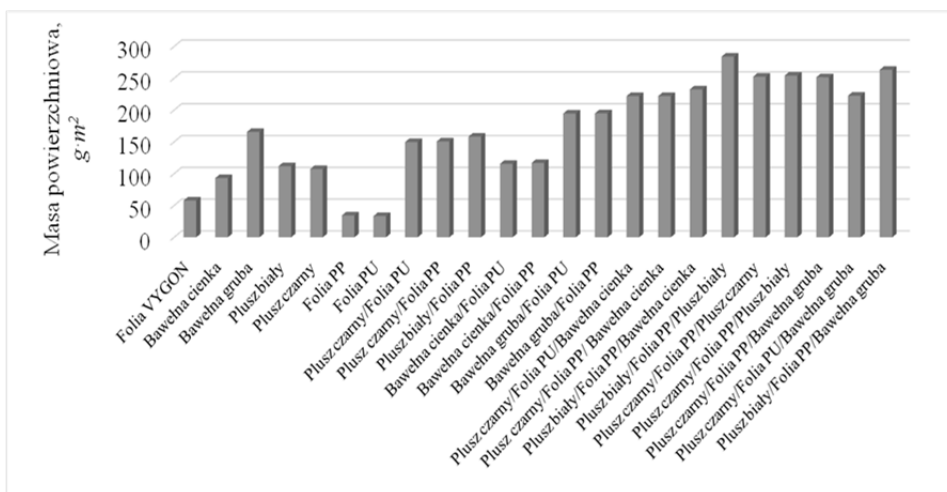


Rys. 72. Wyniki badań podstawowej wielkości chwytu FUKURAMI dzianin z warstwą konduktywno-dyfuzyjną i sorpcyjną oraz dzianin komercyjnych

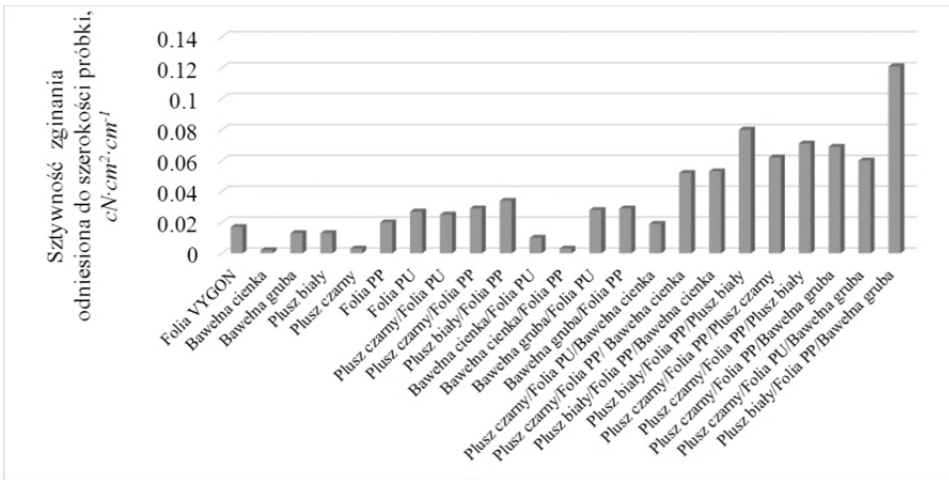
Źródło: opracowanie własne.



Rys. 73. Wyniki badań wskaźnika chwytu całkowitego THV dzianin z warstwą konduktywno-dyfuzyjną i sorpcyjną oraz dzianin komercyjnych  
 Źródło: opracowanie własne.

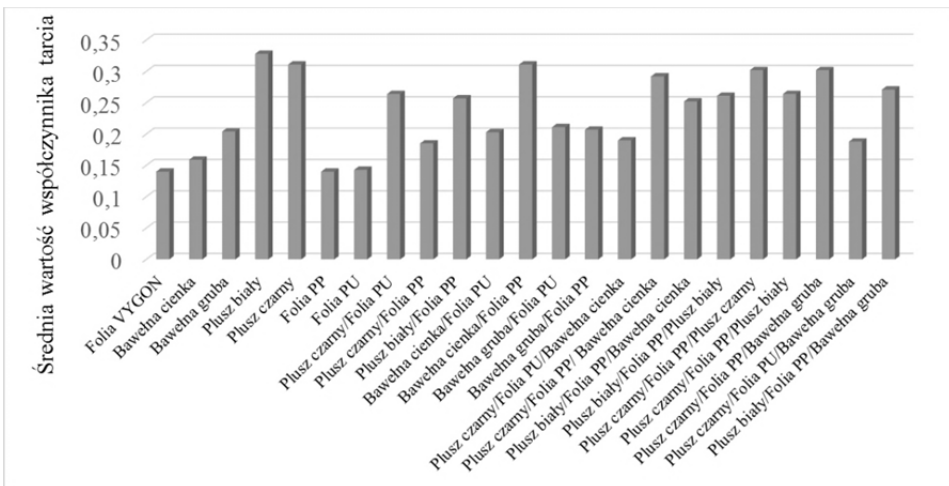


Rys. 74. Wyniki badań masy powierzchniowej dzianin warstwowych z membraną i ich składowych  
 Źródło: opracowanie własne.



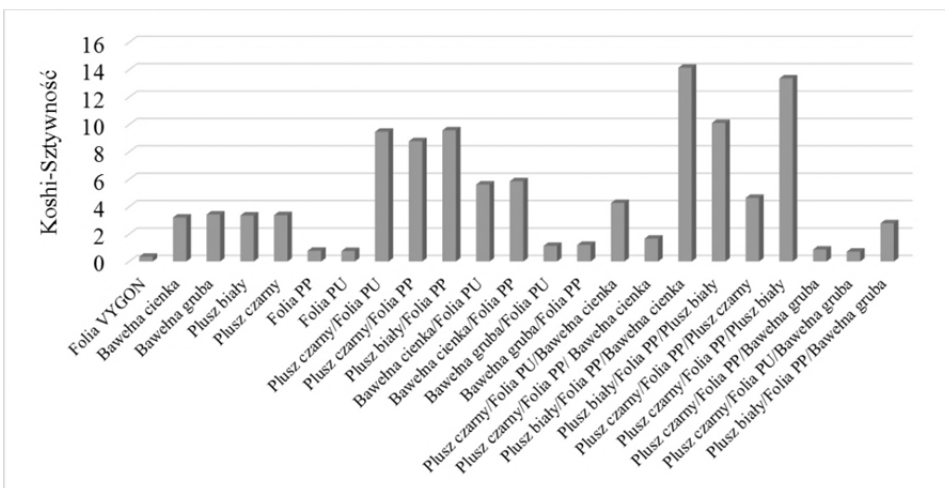
Rys. 75. Wyniki badań sztywności zginania dla dzianin warstwowych z membraną i ich składowych

Źródło: opracowanie własne.



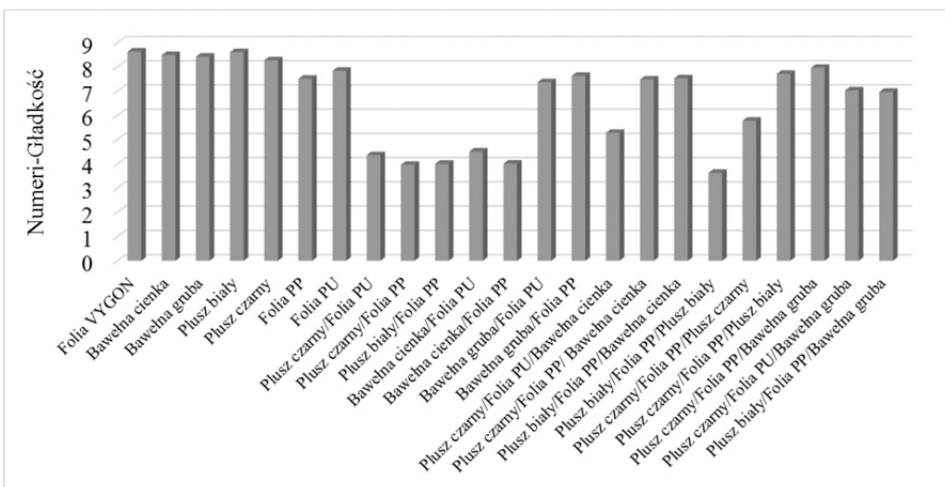
Rys. 76. Wyniki badań współczynnika tarcia dla dzianin warstwowych z membraną i ich składowych

Źródło: opracowanie własne.



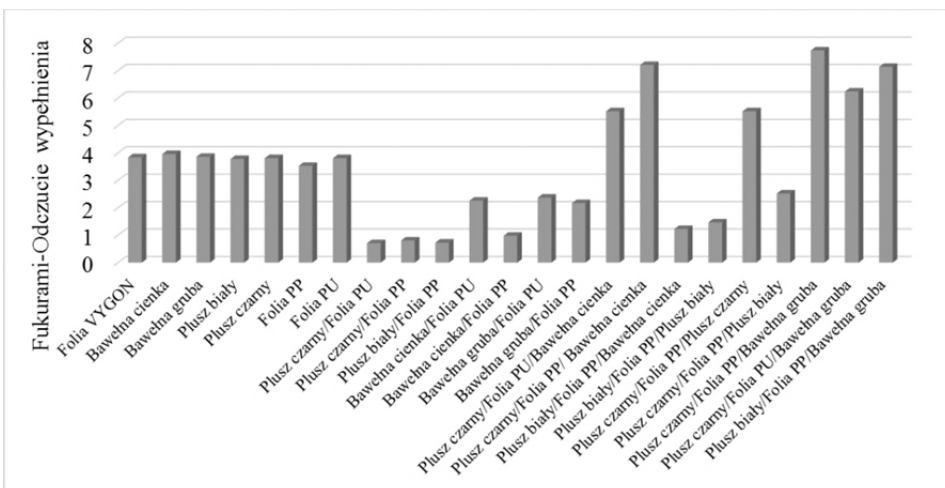
Rys. 77. Wyniki badań podstawowej wielkości chwytu KOSHI dla dzianin warstwowych z membraną i ich składowych

Źródło: opracowanie własne.



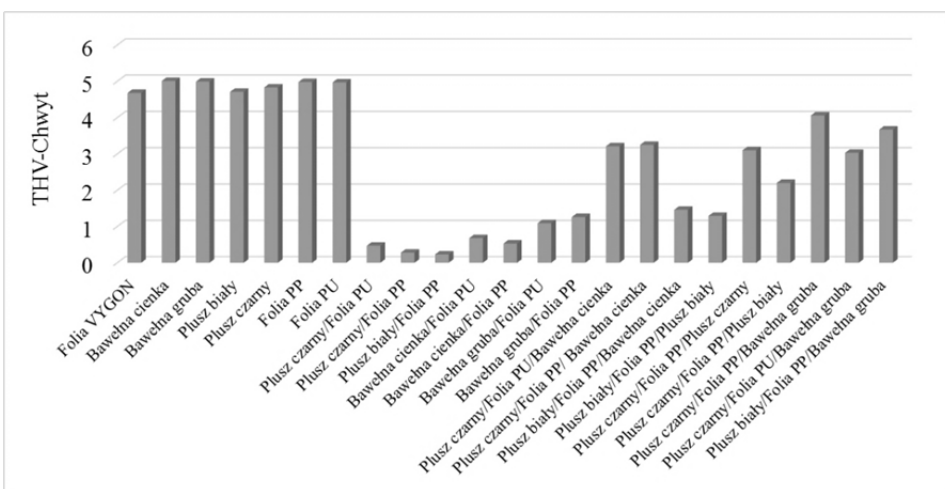
Rys. 78. Wyniki badań podstawowej wielkości chwytu NUMERI dla dzianin warstwowych z membraną i ich składowych

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 79. Wyniki badań podstawowej wielkości chwytu FUKURAMI dla dzianin warstwowych z membraną i ich składowych

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 80. Wyniki badań wskaźnika chwytu całkowitego THV dla dzianin warstwowych z membraną i ich składowych

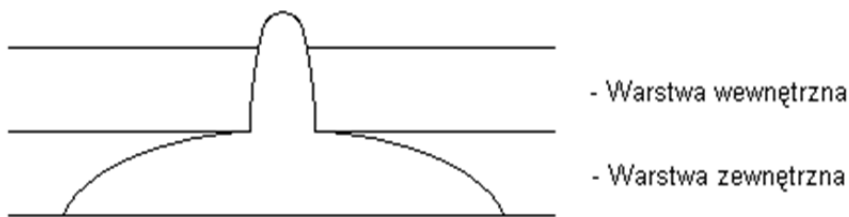
Źródło: opracowanie własne.

## 2.6.2. Analiza właściwości biofizycznych wytworzonych wariantów dzianin

Po dokonaniu analizy właściwości sensorycznych przystąpiono do oceny parametrów decydujących o komforcie fizjologicznym użytkowników. W tym celu zastosowano metody oryginalnie rozwinięte oraz metody znormalizowane. Wyniki badań zostały opisane w kolejnych podrozdziałach.

### 2.6.2.1. Metoda oceny transportu wilgoci w postaci ciekłej w dzianinach dwuwarstwowych testem rozplywu kropli

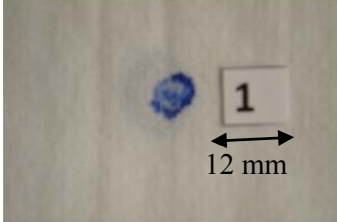









Ocena transportu wilgoci w dzianinach dwuwarstwowych oceniona była za pomocą testu kropelkowego. Z wysokości 4 cm na wewnętrzną stronę wyrobu zakraplano za pomocą pipety 0,1 ml barwionego wodnego roztworu testowego. Każdorazowo roztwór testowy zakraplano na wewnętrzną warstwę dzianiny, tzn. na warstwę wykonaną z nitek konduktywno-dyfuzyjnych, a w przypadku dzianin dwuwarstwowych wykonanych z nitek jednorodnych surowcowo na jedną z warstw (rysunek 81).



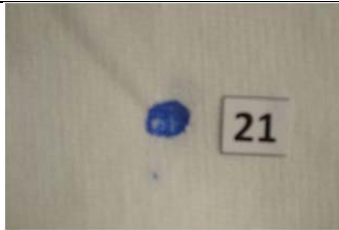



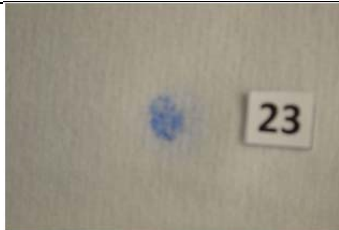

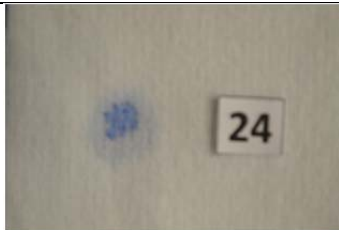



Rys. 81. Zasada testu kropelkowego

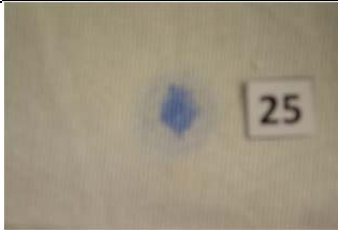
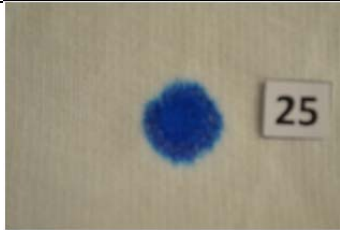
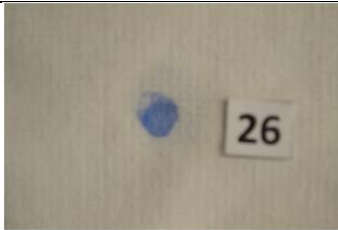
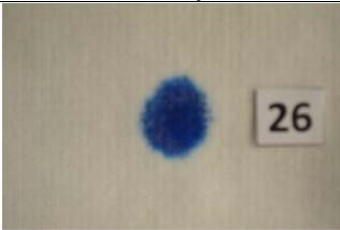
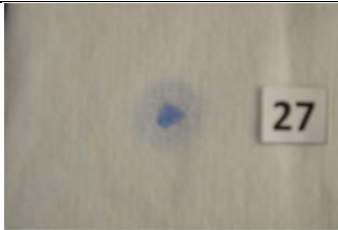



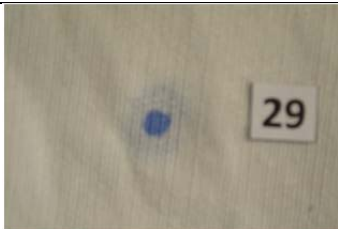

Źródło: opracowanie własne.

Zgodnie z funkcją, jaką powinna spełnić dzianina dwuwarstwowa o podwyższonych walorach biofizycznych, zakraplana kropla powinna dyfundować na stronę zewnętrzną dzianiny, gdzie powinno wystąpić natychmiastowe rozszerzenie się cieczy w tej warstwie dzianiny. Fotografii dwóch stron dzianiny dwuwarstwowej wykonano po upływie około 60 sekund, gdyż po tym czasie nie obserwowano już zmian w wielkości plam po obu stronach dzianiny. Na fotografiach, zestawionych na rysunku 82, przedstawiono przykłady wyników zakroplenia cieczą testową dla różnych dzianin dwuwarstwowych niejednorodnych surowcowo i jednorodnych surowcowo w obu warstwach.

Nr próbki z tabeli 51	Warstwa kondukcyjno-dyfuzyjna	Warstwa sorpcyjna
1		
PP 84 dtex/f25x2		BawBiel 20 tex
10		
PES167 dtex/f96		Baw 20 tex, $\alpha_m = 121$
12		
PA <sub>66</sub> 140 dtex/f102 (TASLAN)		Baw Biel 20 tex
13		
Baw 24 tex		Baw 24 tex
14		
Baw Biel 15 tex		Baw Biel 20 tex

19		
	Baw 20 tex, $\alpha_m = 90$	Baw 20 tex, $\alpha_m = 90$
21		
	PES TREVIRA 150 dtex/f256x1	Baw Biel 20 tex
22		
	PA 140 dtex/f102 TASLAN	Bambus biały 20 tex
23		
	PP 84 dtex/f25x2	Bambus 20 tex
24		
	PP 84 dtex/f25x2	Bambus biały 20 tex



25		
	PE 167 dtex/f96x2	Bambus biały 20 tex
26		
	PES TREVIRA 150 dtex/f256x1	Bambus biały 20 tex
27		
	PP 84 dtex/f25x2	Wiskoza 20 tex
28		
	Wiskoza 20 tex	Wiskoza 20 tex
29		
	PES 167 dtex/f96	Wiskoza 20 tex

Rys. 82. Fotografie wariantów dzianin dwuwarstwowych po upływie 60 s od momentu zakroplenia

Źródło: opracowanie własne.

Przeprowadzone badania rozplywu kropli w dzianinach dwuwarstwowych wykazaly, iz dzianiny wykonane z wewnetrznej warstwy konduktywno-dyfuzyjnej i zewnetrznej sorpcyjnej charakteryzuja sie wysoka zdolnoscia transportu cieczy od warstwy wewnetrznej do zewnetrznej warstwy sorpcyjnej. Dokumentuja to nastepujace numery fotografii: 1, 21-27, 29. Po zakropleniu, wielkosci plam w warstwie sorpcyjnej sa wiekszych rozmiarow niz w warstwie wykonanej z surowcow o wlasciwosciach konduktywno-dyfuzyjnych. Natomiast w przypadku wariantow dzianin wykonanych z surowcow jednorodnych w obu warstwach, wielkosci plam po obu stronach jest zblizonej wielkosci. Ilustruja to nastepujace fotografie: 14, 19, 28. Nalezy zaznaczyc, iz dzianiny dwuwarstwowe z udzialem przędzy bawelnianej surowej tzn. niepoddanej procesowi wykończenia nie charakteryzują się szybkim wchłanianiem cieczy z uwagi na obecność kutikuli. Przykładem takich wariantów dzianin są fotografie 10 i 13 wykonane dla próbek z udziałem bawełny surowej, gdzie nie uzyskano szybkiego rozprężenia się cieczy w zewnętrznej warstwie dzianiny.

### 2.6.2.2. Ocena sorpcji dynamicznej, oporu cieplnego i pary wodnej

Analizę właściwości biofizycznych zgodnie z opisem przedstawionym w rozdziale 1.7.1 przeprowadzono według normy PN-EN ISO 11092:2014-11 [31], wyznaczając takie wielkości znormalizowane, jak: opór cieplny i opór pary wodnej. Znane są również inne metody oceny dodatkowych zjawisk fizycznych, które mają również istotny wpływ na kształtowanie właściwości biofizycznych płaskich wyrobów włókienniczych. Do nich należy między innymi zjawisko sorpcji dynamicznej. Do opisu zmiany zdolności pochłaniania pary wodnej przez płaskie wyroby włókiennicze w czasie służył przyrząd o nazwie SORP 3, zbudowany przez pracowników Instytutu Włókiennictwa i opisany w pracach [124, 125]. Widok ogólny przyrządu przedstawiono na rysunku 83.



Rys. 83. Widok ogólny przyrządu pomiarowego SORP 3: 1 – komora pomiarowa, 2 – poziom cieczy, 3 – płytka Schotta – badana próbka, 5 – uchwyt do próbki, 6 – pompa perystaltyczna wg [125]

Źródło: opracowanie własne.

Komora pomiarowa przyrządu SORP 3 oznaczona cyfrą 1 jest podzielona na dwie części płytką (spiekem) Schotta 3. Układ regulacyjny umożliwia utrzymanie w trakcie pomiaru stałej wartości ciśnienia wytwarzanego przez słup cieczy 2. Próbka 4 jest umieszczana na płytce Schotta za pomocą uchwyty 5, który jedno-

częście stanowi obciążenie próbki. Po wprowadzeniu próbki do kielicha następuje zaabsorbowanie warstwy pary wodnej przez pory próbki i/lub przez włókna. Pod płytką Schotta zmniejszy się ciśnienie wody, co jest rejestrowane przez czujnik ciśnienia. Układ regulacyjny uruchomi pompę perystaltyczną 6, której zadaniem jest wyrównanie ciśnienia pod płytką. W oparciu o rejestrację liczby kroków pompy niezbędnych do wyrównania ciśnienia oblicza się objętość cieczy, jaka została zaabsorbowana przez badaną próbkę w czasie. Przyrząd umożliwia rejestrację kilku parametrów obliczonych na podstawie wykresu krzywej kinetyki sorpcji, takich jak:

- maksymalna prędkość sorpcji, w  $\mu\text{l}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , opisana jako  $V_{\text{max}}$ ,
- wartość maksymalna sorpcji, w  $\mu\text{l}\cdot\text{cm}^{-2}$  oznaczona jako  $S_{\text{max}}$ ,
- czas początkowy w  $s$ , oznaczony jako  $t_0$ ,
- całkowity czas sorpcji w  $s$ , oznaczony jako  $t_{\text{max}}$ ,
- pojemność sorpcyjna, oznaczona jako  $d$ .

Dokładny sposób wyznaczania poszczególnych parametrów omówiono w pracy [30], obecnie w przeprowadzonych doświadczeniach ograniczono się do wyznaczenia sorpcji maksymalnej. Dodatkowo zgodnie z normą PN-EN 13726-2:2005 [126] wyznaczono ilość pary wodnej, jaka przenika przez badaną próbkę pokrywającą pojemnik wypełniony wodą w ciągu 24 godzin. Właściwości wentylacyjne badanych wariantów dzianin wyznaczono zgodnie z normą PN-EN ISO 9237:1998 [127] umożliwiającą ocenę przewodności powietrza. Do badań oporu cieplnego, oprócz metody zdefiniowanej w normie PN-EN ISO 11092:2014-11 [31], zastosowano również metodę dwupłytkową, wykorzystującą zjawisko ustalonej wymiany ciepła. W metodzie tej gradient temperatury wzdłuż grubości próbki wywołany jest w wyniku ogrzewania płyty górnej do temperatury  $35^{\circ}\text{C}$  i utrzymania temperatury dolnej płyty na poziomie  $20^{\circ}\text{C}$ . Przykładem przyrządu dwupłytkowego jest czeskie urządzenie o nazwie Alambeta, którego widok ogólny przedstawiono na rysunku 84. Jego opis zamieszczono w książce [30, 128].



Rys. 84. Zdjęcie przyrządu Alambeta

Źródło: opracowanie własne.

Przy użyciu przyrządu Alambeta można wyznaczyć parametry przedstawione w tabeli 54.

Tabela 54. Parametry mierzone przy użyciu przyrządu Alambeta

Parametry	Definicja	Jednostki
przewodność cieplna, $\lambda$	$\lambda = q \cdot (\text{grad } t)^{-1}$	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
dyfuzja cieplna, $a$	$a = \lambda \cdot (\rho \cdot c)^{-1}$	$m^2 \cdot s^{-1}$
absorpcja termiczna, $b$	$b = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c}$	$W \cdot m^{-2} \cdot s^{1/2} \cdot K^{-1}$
opór cieplny, $r$	$r = Q \cdot \Delta t^{-1} = h \cdot \lambda^{-1}$	$W^{-1} \cdot K \cdot m^2$
grubość próbki, $h$	$h$	$mm$
iloraz przepływu ciepła max i stacjonarnego, $I$	$I = q_{\max} \cdot q_s^{-1}$	-
stacjonarna gęstość przepływu ciepła w miejscu kontaktu, $s$	$s = b \cdot \Delta t \cdot (\pi \cdot t)^{-0,5}$	$W \cdot K \cdot m^{-2}$

W tabeli 54 przyjęto następujące oznaczenia:  $t$  – temperatura ( $K$ ),  $q$  – gęstość strumienia ciepła ( $W \cdot m^{-2}$ ),  $c$  – ciepło właściwe ( $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ),  $\rho$  – gęstość ( $kg \cdot m^{-3}$ ),  $h$  – grubość próbki ( $mm$ ),  $b$  – absorpcja termiczna ( $W \cdot m^{-2} \cdot s^{1/2} \cdot K^{-1}$ ),  $\Delta t$  – różnica temperatur po obu stronach próbki. Zasada pomiaru polega na określeniu mocy prądu elektrycznego, jaką należy dostarczyć do grzałek umieszczonych w górnej głowicy przyrządu celem utrzymania stałej różnicy temperatury pomiędzy płytą górną i dolną na poziomie  $15^\circ C$ . Przy zastosowaniu równania podobnego do równania (65) wyznacza się opór cieplny. Przewodność cieplna jest miarą ilości ciepła przewodzonego przez jednostkę powierzchni w jednostce czasu przy spadku temperatur o  $1 K$  na jednostkę grubości badanego materiału. Dyfuzja cieplna określa się stosunkiem ilości ciepła, która przenika przez warstwę powietrza o jednostkowej grubości w identycznych warunkach, w jakich prowadzi się pomiar. Absorpcja termiczna jest miarą ilości ciepła przewodzonego przez jednostkę powierzchni w jednostce czasu przy spadku temperatur o  $1 K$  na jednostkę objętości badanego materiału. Wyniki zrealizowanych badań dla wytworzonych wariantów dzianin konduktywno-dyfuzyjnych i dzianin komercyjnych przedstawiono odpowiednio w tabelach 55 i 56 i zilustrowano na rysunkach 85-96. Wyniki badań dla laminatów i ich składowych przedstawiono w tabelach 57-58 oraz zilustrowano na rysunkach 97-108.

Tabela 55. Wyniki pomiaru właściwości biofizycznych wyznaczone zgodnie z normą PN-EN ISO 11092:2014-11 [31], [126] i [127] i instrukcją [124] dla dzianin konduktywno-dyfuzyjnych i dzianin komercyjnych

Opis próbki	Masa pow.	Przep. powietrza	Opór cieplny	Opór pary wodnej	Przep. pary wodnej graw.	Max. wartość sorpcji
	$g \cdot m^{-2}$	$mm \cdot s^{-1}$	$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$	$m^2 \cdot Pa \cdot W^{-1}$	$g \cdot m^{-2} \cdot (24h)^{-1}$	$\mu l \cdot cm^{-2}$
<b>Dzianiny bawełniano-polipropylenowe łączone nitką PA66</b>						
BawBiel 20 tex PP 84 dtex/f25x2/ PA66 22 dtex/f7	225,05	491	0,023	6,294	5177,97	124
Baw 20 tex PP 84 dtex/f25x2/ PA66 22 dtex/f7	205,98	568	0,027	8,156	5307,26	1,34
Baw 20 tex PP 84 dtex/f25x2/ PA66 22 dtex/f7	197,71	479	0,024	6,966	8073,42	8,12
Baw 24 tex PP 84 dtex/f25x2/ PA66 22 dtex/f7	235,22	403	0,026	2,985	5166,80	111
W3 Baw Czes PP 84 dtex/f25x2/ PA66 22 dtex/f7	242,21	447	0,023	5,764	5146,05	8,57
W1 20 tex 671skr PP 84 dtex/f25x2/ PA66 22 dtex/f7	232,68	414	0,030	6,031	5988,83	3,69
W2 20 tex PP 84 dtex/f25x2/ PA66 22 dtex/f7	236,49	434	0,034	11,383	7206,70	1,26
<b>Dzianiny bawełniano-poliestrowe łączone nitką PA66</b>						
Baw 20 tex PES 167 dtex/f96 PA66 22 dtex/f7	207,88	679	0,028	7,189	5433,89	9,15
BawBiel 20 tex PES 167 dtex/f96/ PA66 22 dtex/f7	221,23	801	0,024	1,886	5157,22	4,33
Baw 20 tex PES TREVIRA 150 dtex/f256x1/ PA66 22 dtex/f7	226,95	460	0,026	3,346	4934,82	99,7
Baw Biel 20 tex PES TREVIRA 150 dtex/f256x1/ PA66 22 dtex/f7	199,62	498	0,022	4,238	4576,22	84,4
Baw 24 tex PES 167 dtex/f96/ PA66 22 dtex/f7	219,96	675	0,025	2,15	4972,06	109

Opis próbki	Masa pow.	Przep. powietrza	Opór cieplny	Opór pary wodnej	Przep. pary wodnej graw.	Max. wartość sorpcji
	$g \cdot m^{-2}$	$mm \cdot s^{-1}$	$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$	$m^2 \cdot Pa \cdot W^{-1}$	$g \cdot m^{-2} \cdot (24h)^{-1}$	$\mu l \cdot cm^{-2}$
<b>Dzianiny bawełniano-poliamidowe łączone nitką PA66</b>						
Baw 20 tex PA66 78 dtex/f68x2/ PA66 22 dtex /f7	220,6	342	0,037	5,574	5456,24	120
BawBiel 20tex PA66 140 dtex/f102 (TASLAN)/ PA66 22 dtex/f7	181,82	1130	0,027	2,42	6178,77	5,39
<b>Dzianiny bambusowo-polipropylenowe łączone nitką PA66</b>						
Bambus 20 tex PP 84 dtex/f25x2/ PA66 22 dtex/f7	228,23	636	0,026	2,632	5236,50	83,4
Bambus 20 tex PP 84dtex/f25x2/ PA66 22 dtex/f7 biały	235,86	570	0,023	2,172	6502,79	150
<b>Dzianiny bambusowo-poliestrowe łączone nitką PA66</b>						
Bambus 20 tex PES167 dtex/f96/ PA66 22 dtex/f7	232,04	834	0,025	3,041	7135,94	130
Bambus 20 tex PES TREVIRA 150 dtex/f256x1/ PA66 22 dtex/f7	221,87	527	0,025	2,458	7616,39	96,5
<b>Dzianiny bambusowo-poliamidowe łączone nitką PA66</b>						
Bambus 20 tex PA140 dtex/f102 TASLAN PA66 22 dtex/f7	194,53	1550	0,0268	1,778	21016,76	111
<b>Dzianiny wiskozowo-polipropylenowe łączone nitką PA66</b>						
Wiskoza 20 tex PP 84 dtex/f25x2 PA66 22 dtex/f7	236,49	537	0,0279	2,919	5314,71	125
<b>Dzianiny wiskozowo-poliestrowe łączone nitką PA66</b>						
Wiskoza 20 tex PES 167 dtex/f96/ PA66 22 dtex/f7	221,23	963	0,0259	2,262	17415,27	246
<b>Dzianiny dwustronne z tego samego surowca</b>						
Wiskoza 20 tex Wiskoza 20 tex/ PA66 22 dtex/f7	238,40	1080	0,0255	2,868	13247,67	181
BawBiel 20 tex BawBiel 15 tex/ PA66 22 dtex/f7	191,35	992	0,0279	2,918	6785,85	7,25

Opis próbki	Masa pow.	Przep. powietrza	Opór cieplny	Opór pary wodnej	Przep. pary wodnej graw.	Max. wartość sorpcji
	$g \cdot m^{-2}$	$mm \cdot s^{-1}$	$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$	$m^2 \cdot Pa \cdot W^{-1}$	$g \cdot m^{-2} \cdot (24h)^{-1}$	$\mu l \cdot cm^{-2}$
W3 W1/ PA66 22 dtex/f7	222,50	580	0,0314	6,152	6700,72	4,74
W3 W2/ PA66 22 dtex/f7	241,58	590	0,0358	7,091	4075,02	10,5
W3 W3/ PA66 22 dtex/f7	229,50	592	0,0366	6,382	6161,21	1,09
W2 W2/ PA66 22 dtex/f7	235,86	598	0,0238	3,29	4505,99	161
W1 W1/ PA66 22dtex/f7	227,59	538	0,027	4,072	4826,82	99,8
Baw 24 tex Baw 24 tex/ PA66 22 dtex/f7	215,51	499	0,030	2,865	4659,22	4,51
Dzianiny komercyjne						
93% wiskoza bambusowa, 7% elastan	222,03	366,6	0,023	5,902	10486,65	143,08
50% wiskoza modal, 50% bawełna	153,94	1118	0,023	7,378	5109,56	128,26
77% wiskoza, 23% poliester	169,45	1150	0,026	5,547	6375,85	108,02
46% bawełna, 54% poliester	155,53	890,4	0,032	4,553	4664,49	94,48
95% bawełna, 5% elastan	187,68	182,2	0,030	9,497	4227,47	18,07
95% wiskoza, 5% elastan	230,48	235	0,019	4,928	7695,53	119,6
100% bawełna	187,33	333	0,018	6,457	5109,87	8,946

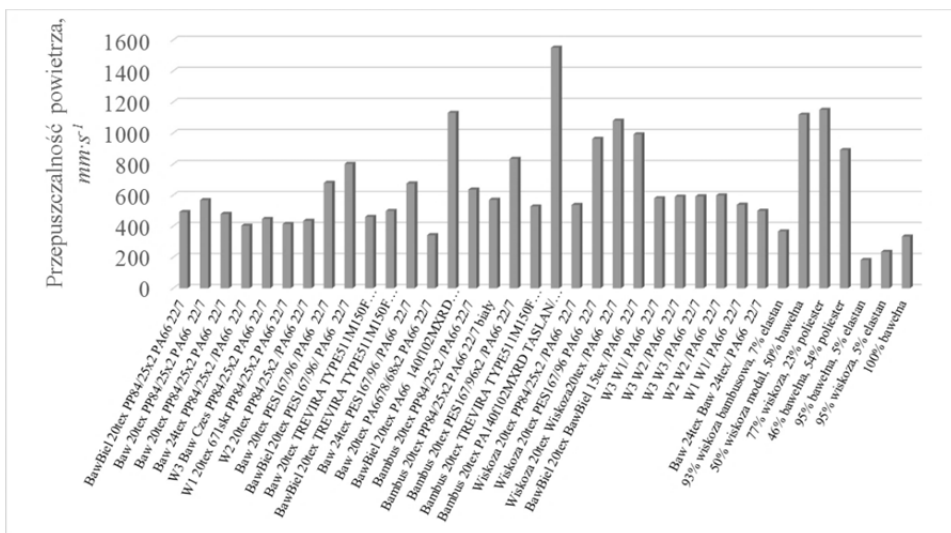
Tabela 56. Wielkości charakteryzujące właściwości biofizyczne dzianin konduktywno-dyfuzyjnych i dzianin komercyjnych wyznaczone przy użyciu przyrządu Alambeta

Opis próbki	Przew. cieplna	Dyfuzja cieplna	Absorpcja termiczna	Opór cieplny	Grubość próbki	Iloraz przepływu ciepła maks. do stacjonarnego	Stacjonarna gęstość przepływu ciepła
	$10^{-3} W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	$10^{-6} m^2 \cdot s^{-1}$	$W \cdot s^{0,5} \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	$10^{-3} m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$	mm	–	$K \cdot W \cdot m^{-2}$
<b>Dzianiny bawełniano-polipropylenowe łączone nitką PA66</b>							
BawBiel 20 tex PP 84 dtex/f25x2/ PA66 22 dtex/f7	67,8	0,194	154	21	1,42	2,55	1,33
Baw 20 tex PP 84 dtex/f25x2/ PA66 22 dtex/f7	67,3	0,256	144	22,6	1,75	2,57	1,28
Baw 20 tex PP 84 dtex/f25x2/ PA66 22 dtex/f7	62,8	0,189	144	23	1,44	2,56	1,24
Baw 24 tex PP 84 dtex/f25x2/ PA66 22 dtex/f7	74	0,238	152	21,8	1,61	2,66	1,35
W3 Baw Czes PP 84 dtex/f25x2/ PA66 22 dtex/f7	76,2	0,226	155	22,1	1,9	2,67	1,33
W1 20 tex 671skr PP 84 dtex/f25x2/ PA66 22 dtex/f7	74	0,222	148	23,8	2	2,62	1,21
W2 20 tex PP 84 dtex/f25x2/ PA66 22 dtex/f7	69,9	0,226	147	23	1,61	2,69	1,29
<b>Dzianiny bawełniano-poliestrowe łączone nitką PA66</b>							
Baw 20 tex PES 167 dtex/f96 PA66 22 dtex/f7	65,5	0,207	144	20,5	1,34	2,74	1,45
BawBiel 20 tex PES 167 dtex/f96/ PA66 22 dtex/f7	59,8	0,187	138	20,2	1,2	2,49	1,33
Baw 20 tex PES TREVIRA 150 dtex/f256x1/ PA66 22 dtex/f7	65,4	0,255	130	22	1,44	2,38	1,16
Baw Biel 20 tex PES TREVIRA 150 dtex/f256x1/ PA66 22 dtex/f7	62,3	0,211	136	21,2	1,32	2,44	1,25



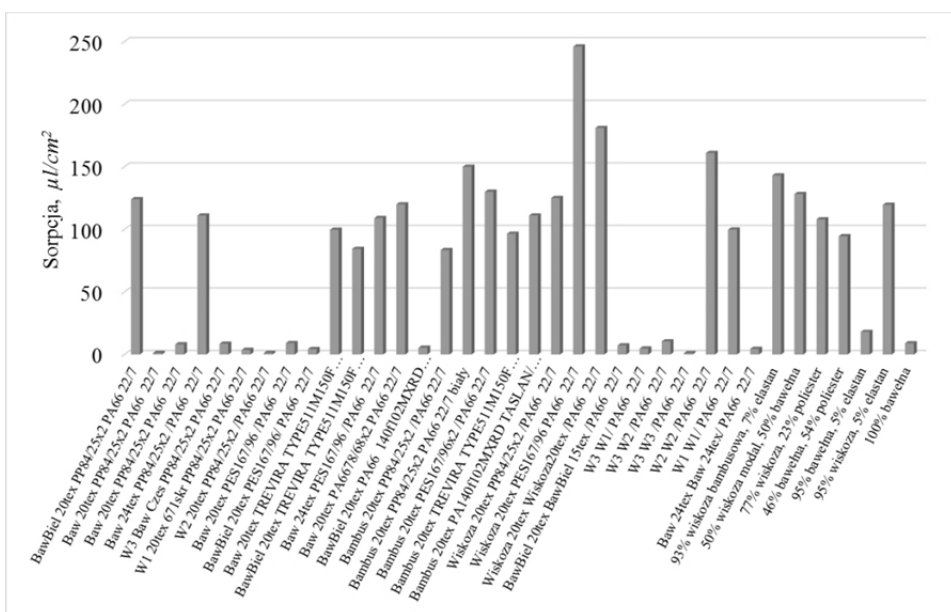
Opis próbki	Przew. cieplna	Dyfuzja cieplna	Absorpcja termiczna	Opór cieplny	Grobość próbki	Iloraz przepływu ciepła maks. do stacjonarnego	Stacjonarna gęstość przepływu ciepła
	$10^{-3} W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	$10^{-6} m^2 \cdot s^{-1}$	$W \cdot s^{0,5} \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	$10^{-3} m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$	mm	–	$K \cdot W \cdot m^{-2}$
Baw 24 tex PES 167 dtex/f96/ PA66 22 dtex/f7	64,7	0,202	144	19,6	1,27	2,63	1,44
<b>Dzianiny bawełniano-poliamidowe łączone nitką PA66</b>							
Baw20 tex PA66 78 dtex/f68x2/ PA66 22 dtex /f7	72,7	0,285	144	20	1,24	2,4	1,34
BawBiel 20 tex PA66 140 dtex/f102 (TASLAN)/ PA66 22 dtex/f7	64	0,212	139	19,6	1,26	2,29	1,25
<b>Dzianiny bambusowo-polipropylenowe łączone nitką PA66</b>							
Bambus 20 tex PP 84 dtex/f25x2/ PA66 22 dtex/f7	68,7	0,212	159	20,1	1,38	2,94	1,54
Bambus 20 tex PP 84 dtex/f25x2 PA66 22 dtex/f7 biały	66,4	0,178	157	20,4	1,36	2,36	1,26
<b>Dzianiny bambusowo-poliestrowe łączone nitką PA66</b>							
Bambus 20 tex PES 167 dtex/f96/ PA66 22 dtex/f7	54,9	0,135	150	20,7	1,14	3,13	1,66
Bambus 20 tex PES TREVIRA 150 dtex /f256x1/ PA66 22 dtex/f7	62,7	0,174	150	20,6	1,29	2,91	1,54
<b>Dzianiny bambusowo-poliamidowe łączone nitką PA66</b>							
Bambus 20 tex PA 140 dtex/f102 TASLAN/ PA66 22 dtex/f7	63,5	0,147	166	18,1	1,15	2,85	1,66

Dzianiny wiskozowo-polipropylenowe łączone nitką PA66							
Wiskoza 20 tex PP 84 dtex/ f25x2/ PA66 22 dtex/f7	64,8	0,156	164	21,7	1,4	3,14	1,58
Dzianiny wiskozowo-poliestrowe łączone nitką PA66							
Wiskoza 20 tex PES 167 dtex/ f96/ PA66 22 dtex/f7	57,8	0,143	153	20,7	1,2	3,09	1,62
Dzianiny dwustronne z tego samego surowca							
Wiskoza 20 tex Wiskoza 20 tex/ PA66 22 dtex/f7	67,8	0,146	178	16,6	1,12	2,68	1,68
BawBiel 20 tex BawBiel 15 tex/ PA66 22 dtex/f7	62,3	0,312	111	19	1,18	1,85	1,04
W3 W1/ PA66 22 dtex/f7	68,1	0,225	144	20,2	1,38	2,28	1,21
W3 W2/ PA66 22 dtex/f7	69,7	0,215	150	20,2	1,41	2,36	1,27
W3 W3/ PA66 22 dtex/f7	72,3	0,232	150	19	1,38	2,24	1,26
W2 W2/ PA66 22 dtex/f7	69,7	0,238	143	20	1,39	2,2	1,18
W1 W1/ PA66 22 dtex/f7	68,7	0,253	137	19,6	1,34	2,18	1,18
Baw 24 tex Baw 24 tex/ PA66 22 dtex/f7	73,6	0,22	157	18,4	1,36	2,39	1,39
Dzianiny komercyjne							
93% wiskoza bambusowa, 7% elastan	66,4	0,161	166	8,6	0,57	1,33	1,42
50% wiskoza modal, 50% bawełna	71,4	0,112	216	9,7	0,69	1,64	1,62
77% wiskoza, 23% poliester	65,4	0,079	242	7,7	0,50	1,64	1,91
46% bawełna, 54% poliester	65,3	0,130	183	9,0	0,59	1,46	1,51
95% bawełna, 5% elastan	66	0,162	165	8,5	0,58	1,42	1,45
95% wiskoza, 5% elastan	77,4	0,113	233	9,9	0,77	1,78	1,71
100% bawełna	83,1	0,170	205	9,0	0,75	1,53	1,58



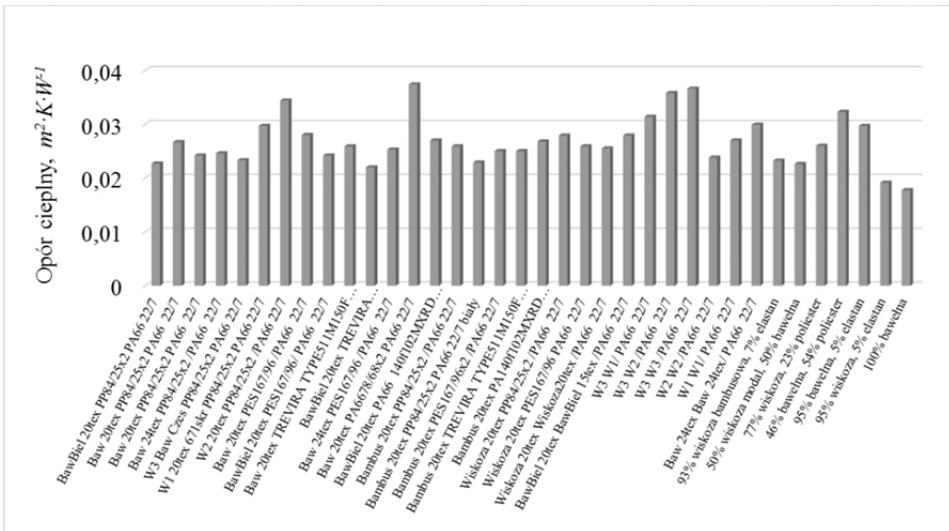
Rys. 85. Ilustracja zmian przepuszczalności powietrza wyznaczonej wg normy PN-EN ISO 9237:1998 [127] dla dzianin z warstwą konduktywno-dyfuzyjną i sorpcyjną oraz dzianin komercyjnych

Źródło: opracowanie własne.



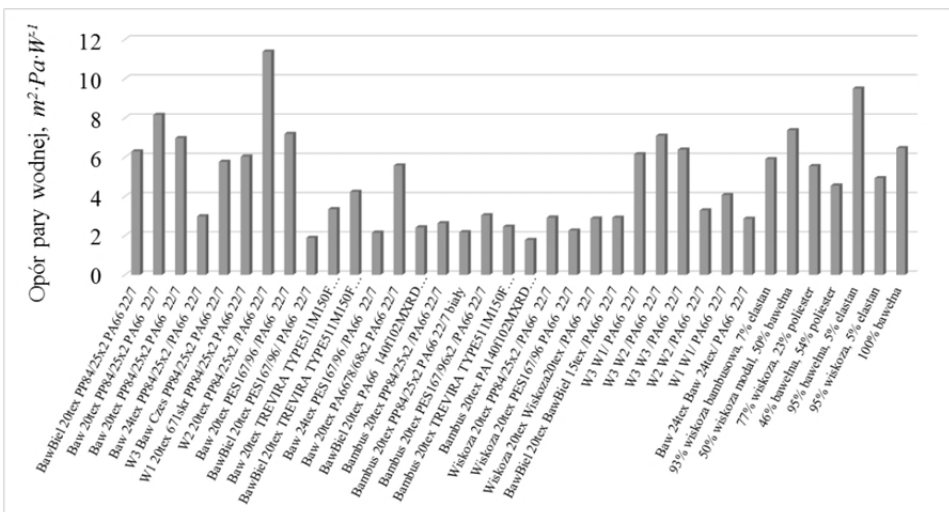
Rys. 86. Ilustracja zmian maksymalnej wartości sorpcji wilgoci dla dzianin z warstwą konduktywno-dyfuzyjną i sorpcyjną oraz dzianin komercyjnych

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 87. Ilustracja zmian oporu cieplnego wyznaczonego wg normy PN-EN ISO 11092:2014-11 [31] dla dzianin z warstwą kondukcyjno-dyfuzyjną i sorpcyjną oraz dzianin komercyjnych

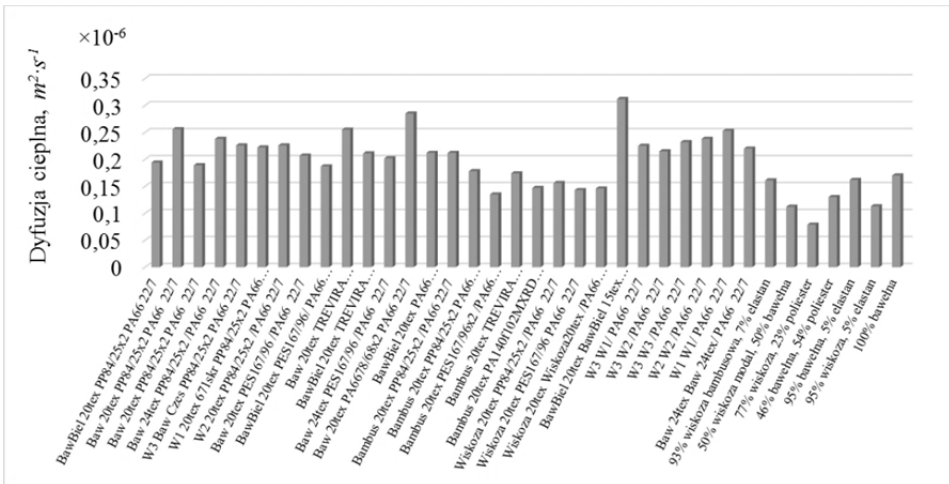
Źródło: opracowanie własne.



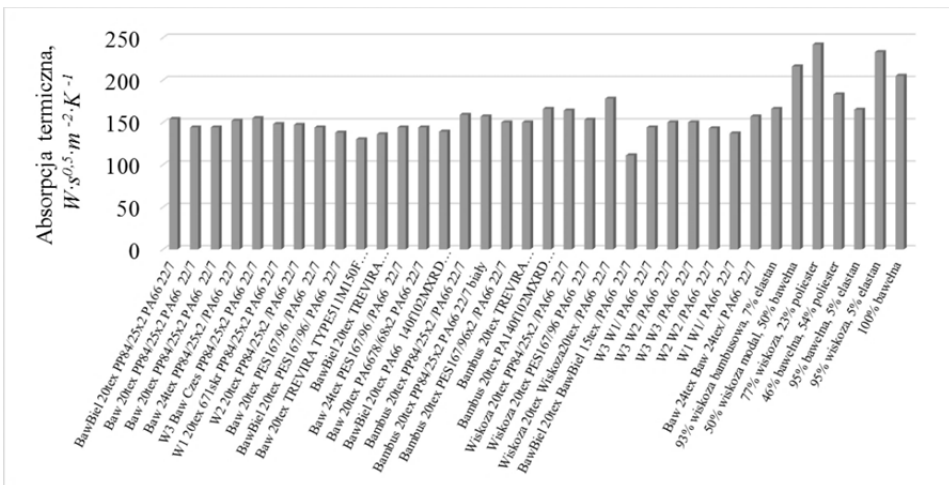
Rys. 88. Ilustracja zmian oporu pary wodnej wyznaczonego wg normy PN-EN ISO 11092:2014-11 [31] dla dzianin z warstwą kondukcyjno-dyfuzyjną i sorpcyjną oraz dzianin komercyjnych

Źródło: opracowanie własne.



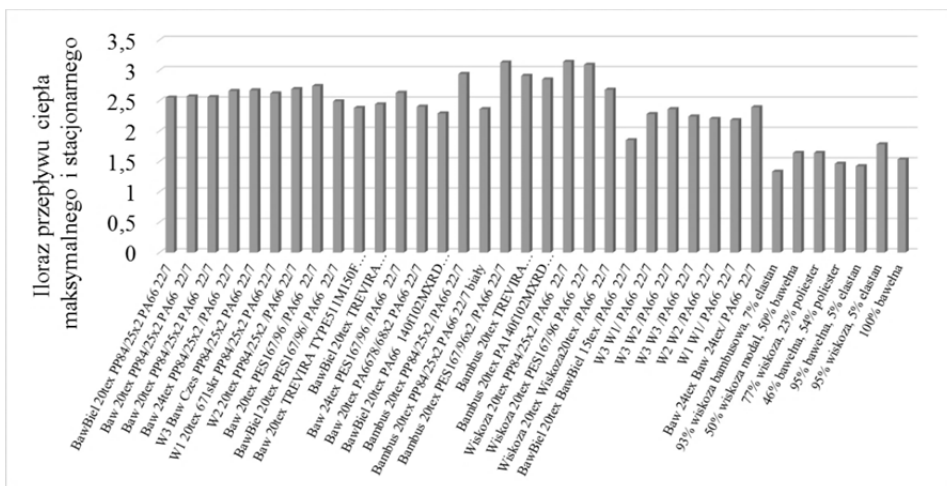


Rys. 91. Ilustracja zmian dyfuzji cieplnej wyznaczonej przy użyciu przyrządu Alambeta dla dzianin z warstwą kondukcyjno-dyfuzyjną i sorpcyjną oraz dzianin komercyjnych  
 Źródło: opracowanie własne.



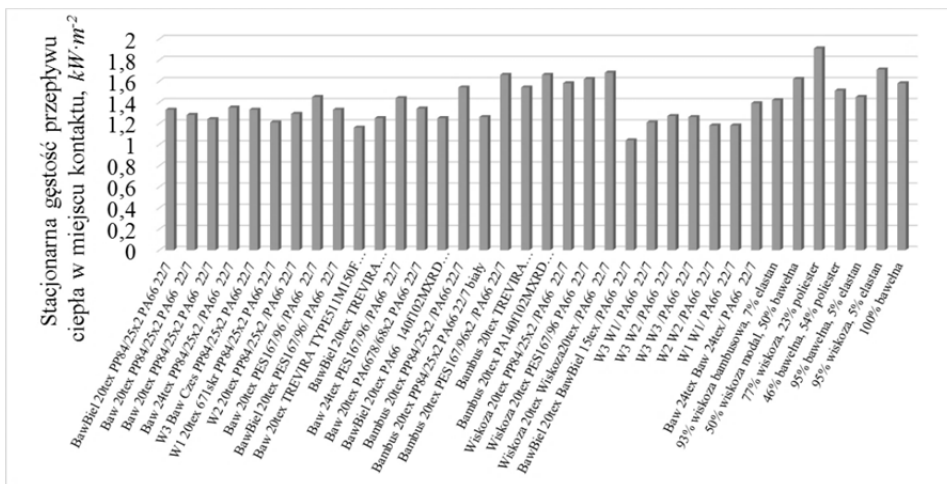
Rys. 92. Ilustracja zmian absorpcji termicznej wyznaczonej przy użyciu przyrządu Alambeta dla dzianin z warstwą kondukcyjno-dyfuzyjną i sorpcyjną oraz dzianin komercyjnych  
 Źródło: opracowanie własne.





Rys. 95. Ilustracja zmian ilorazu przepływu ciepła maksymalnego i stacjonarnego wyznaczonego przy użyciu przyrządu Alambeta dla dzianin z warstwą kondukcyjno-dyfuzyjną i sorpcyjną oraz dzianin komercyjnych

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 96. Ilustracja zmian stacjonarnej gęstości przepływu ciepła wyznaczonej przy użyciu przyrządu Alambeta dla dzianin z warstwą kondukcyjno-dyfuzyjną i sorpcyjną oraz dzianin komercyjnych

Źródło: opracowanie własne.



Tabela 57. Wyniki pomiaru właściwości biofizycznych wyznaczone zgodnie z normą PN-EN ISO 11092:2014-11 [31], [126] i [127] i instrukcją [124] dla laminatów i ich składowych

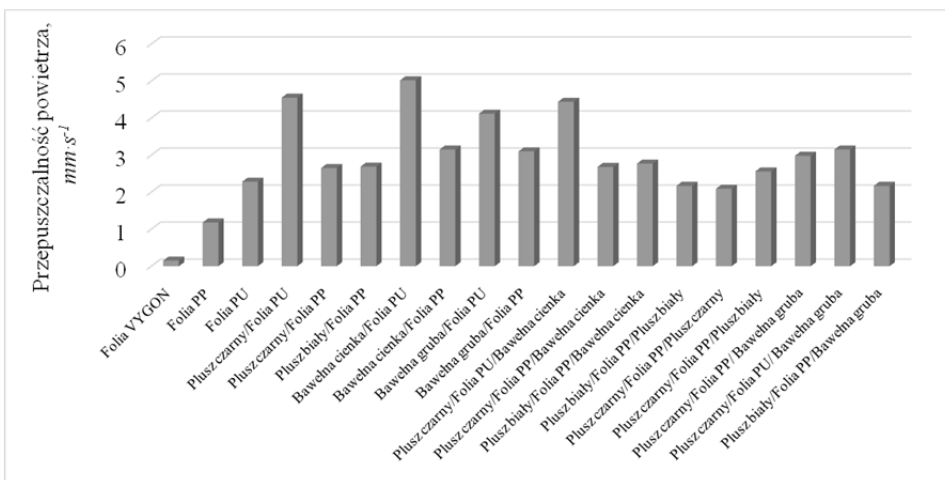
Opis próbki	Masa pow.	Przep. powietrza	Opór cieplny	Opór pary wodnej	Przep. pary wodnej graw.	Sorpcja
	$g \cdot m^{-2}$	$mm \cdot s^{-1}$	$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$	$m^2 \cdot Pa \cdot W^{-1}$	$g \cdot m^{-2} \cdot (24h)^{-1}$	$\mu l \cdot cm^{-2}$
Folia VYGON	57,83	0,149	0,0057	-		
Materiał wyjściowy						
Bawełna cienka	93,10	1830	0,0244	6,4368	78,21	-
Bawełna gruba	165,53	687	0,0243	5,9095	4729,85	9,11
Plusz biały	111,86	1880	0,0359	7,462	4863,41	135,00
Plusz czarny	107,20	1850	0,0302	6,798	4652,21	22,70
Folia PP	34,33	1,18	0,0328	-	4178,77	188,00
Folia PU	33,31	2,28	0,0310	10,982	151,96	-
Układy dwuwarstwowe						
Plusz czarny/ Folia PU	149,72	4,55	0,0415	13,9915	2785,98	105,00
Plusz czarny/ Folia PP	150,67	2,65	0,0491	573,15	470,32	46,90
Plusz biały/ Folia PP	158,13	2,69	0,0335	515,005	490,56	18,20
Bawełna cienka/ Folia PU	115,43	5,02	0,0251	11,231	2433,32	3,89
Bawełna cienka/ Folia PP	116,97	3,15	0,0256	583,2114	911,77	7,17
Bawełna gruba/ Folia PU	194,65	4,12	0,0469	13,9827	2978,43	64,00
Bawełna gruba/ Folia PP	194,90	3,1	0,0527	552,1420	491,86	114,00
Układy trójwarstwowe						
Plusz czarny/ Folia PU/ Bawełna cienka	221,98	4,44	0,0474	33,8675	1458,10	101,00 str. plusz 11,00 str. Bawełna
Plusz czarny/ Folia PP/ Bawełna cienka	222,05	2,68	0,0372	541,942	398,82	129,00 str. plusz 39,70 str. Bawełna
Plusz biały/ Folia PP/ Bawełna cienka	232,48	2,77	0,0518	429,9931	515,03	30,70 str. plusz 14,50 str. Bawełna
Plusz biały/ Folia PP/ Plusz biały	283,90	2,17	0,0658	881,165	285,99	19,30
Plusz czarny/ Folia PP/ Plusz czarny	252,45	2,09	0,0567	706,674	581,01	155,00

Opis próbki	Masa pow.	Przep. powietrza	Opór cieplny	Opór pary wodnej	Przep. pary wodnej graw.	Sorpcja
	$g \cdot m^{-2}$	$mm \cdot s^{-1}$	$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$	$m^2 \cdot Pa \cdot W^{-1}$	$g \cdot m^{-2} \cdot (24h)^{-1}$	$\mu l \cdot cm^{-2}$
Plusz czarny/ Folia PP/ Plusz biały	254,33	2,56	0,0505	831,483	408,65	149,00 str. plusz 117,00 str. bawełna
Plusz czarny/Folia PP/Bawełna gruba	251,65	2,98	0,0289	418,182	1192,12	180,00 str. plusz 131,00 str. bawełna
Plusz czarny/Folia PU/Bawełna gruba	222,63	3,15	0,039	41,616	2173,18	134,00 str. plusz 127,00 str. bawełna
Plusz biały/Folia PP/Bawełna gruba	263,21	2,17	0,049	679,417	527,43	156,00 str. plusz 133,00 str. bawełna

Tabela 58. Wyniki pomiaru właściwości biofizycznych wyznaczone przy użyciu przyrządu Alambeta dla laminatów i ich składowych

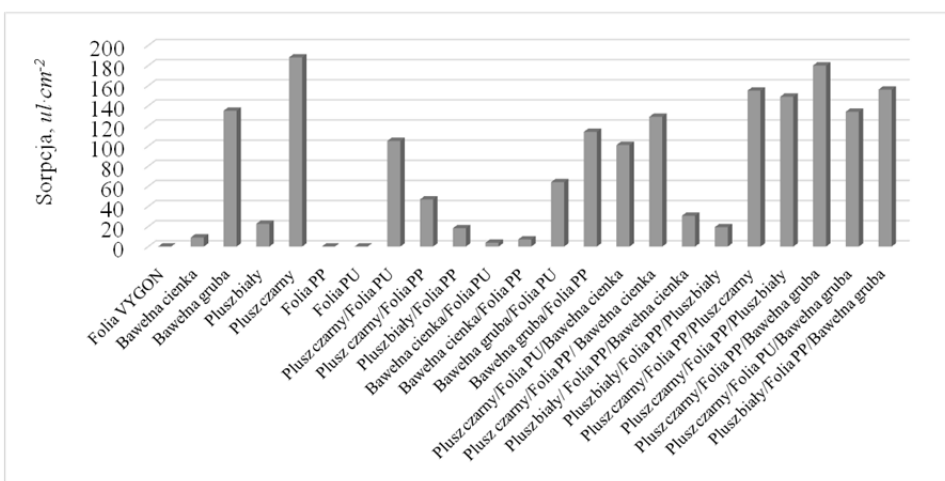
Opis próbki	Przew. cieplna	Dyfuzja cieplna	Absorpcja termiczna	Opór cieplny	Grubość próbki	Iloraz przepływu ciepła maks. i stacjonarnego	Stacjonarna gęstość przepływu ciepła
	$10^{-3} W \cdot (m \cdot K)^{-1}$	$10^{-6} m^2 \cdot s^{-1}$	$W \cdot s^{0,5} \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	$10^{-3} m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$	mm	-	$K \cdot W \cdot m^{-2}$
<b>Materiały wyjściowe</b>							
Folia VYGON	30,10	0,00	466,00	2,00	0,06	1,14	2,73
Bawełna cienka	76,60	0,10	246,00	6,90	0,53	1,18	1,50
Bawełna gruba	48,00	0,14	127,00	10,00	0,48	1,42	1,36
Plusz biały	42,50	0,52	58,80	33,50	1,42	1,61	0,54
Plusz czarny	40,60	0,18	96,00	27,20	1,10	2,30	0,93
Folia PP	88,50	0,04	429,00	1,90	0,02	1,10	2,67
Folia PU	141,00	0,20	318,00	1,80	0,03	1,04	2,58
<b>Układy dwuwarstwowe</b>							
Plusz czarny/ Folia PU	57,10	0,34	98,10	16,30	0,93	1,16	0,73
Plusz czarny/ Folia PP	50,80	0,24	103,00	15,50	0,79	1,17	0,77
Plusz biały/ Folia PP	49,10	0,32	86,60	16,70	0,82	1,30	0,79
Bawełna cienka/ Folia PU	106,00	0,19	242,00	4,90	0,52	1,08	1,64

Opis próbki	Przew. cieplna	Dyfuzja cieplna	Absorpcja termiczna	Opór cieplny	Grubość próbki	Iloraz przepływu ciepła maks. i stacjonarnego	Stacjonarna gęstość przepływu ciepła
	$10^{-3} W \cdot (m \cdot K)^{-1}$	$10^{-6} m^2 \cdot s^{-1}$	$W \cdot s^{0,5} \cdot m^{-2} K^{-1}$	$10^{-3} m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$	mm	-	$K \cdot W \cdot m^{-2}$
Bawełna cienka/ Folia PP	101,00	0,19	214,00	5,00	0,51	1,01	1,05
Bawełna gruba/ Folia PU	64,40	0,12	188,00	9,60	0,62	1,42	1,37
Bawełna gruba/ Folia PP	83,40	0,21	181,00	8,10	0,67	1,30	1,43
Układy trójwarstwowe							
Plusz czarny/ Folia PU/ Bawełna cienka	55,30	0,31	98,80	23,30	1,28	1,46	0,68
Plusz czarny/ Folia PP/ Bawełna cienka	70,51	0,15	192,63	23,09	1,37	2,01	1,19
Plusz biały/ Folia PP/ Bawełna cienka	54,30	0,32	96,70	24,30	1,32	1,62	0,73
Plusz biały/ Folia PP/ Plusz biały	52,60	0,17	129,00	36,80	1,94	2,41	0,76
Plusz czarny/ Folia PP/ Plusz czarny	75,19	0,15	205,79	20,97	1,31	1,95	1,26
Plusz czarny/ Folia PP/ Plusz biały	49,40	0,24	101,00	36,80	1,82	2,17	0,69
Plusz czarny/ Folia PP/ Bawełna gruba	82,10	0,13	244,67	17,27	1,19	2,06	1,59
Plusz czarny/ Folia PU/ Bawełna gruba	56,00	0,17	139,00	20,30	1,14	1,55	0,82
Plusz biały/ Folia PP/ Bawełna gruba	47,50	0,15	123,00	25,80	1,22	1,83	0,78



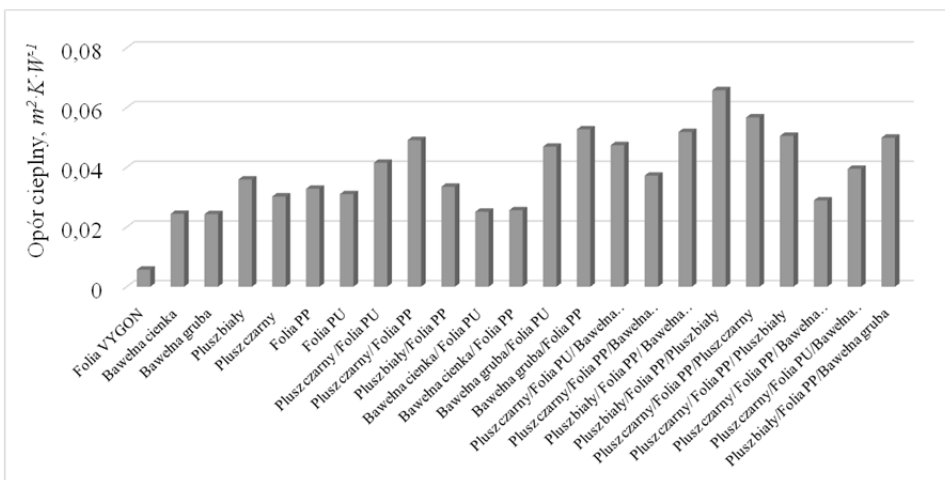
Rys. 97. Ilustracja zmian przepuszczalności powietrza wyznaczonej wg normy PN-EN ISO 9237:1998 [127] dla laminatów i ich składowych

Źródło: opracowanie własne.



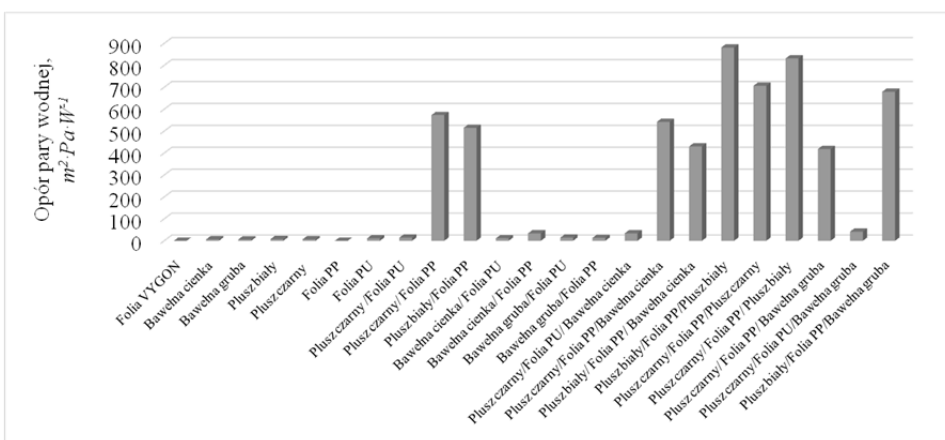
Rys. 98. Ilustracja zmian maksymalnej wartości sorpcji wilgoci dla laminatów i ich składowych

Źródło: opracowanie własne.



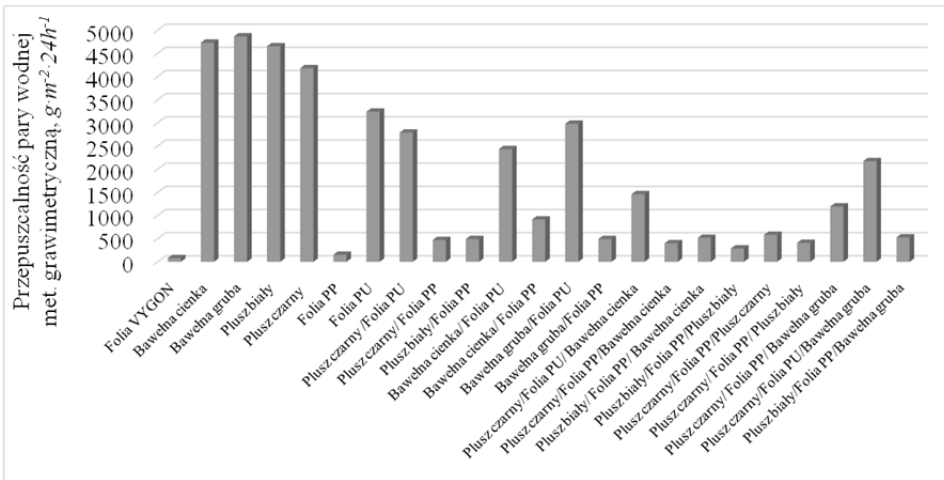
Rys. 99. Ilustracja zmian oporu cieplnego wyznaczonego wg normy PN-EN ISO 11092 2014-11 [31] dla laminatów i ich składowych

Źródło: opracowanie własne.



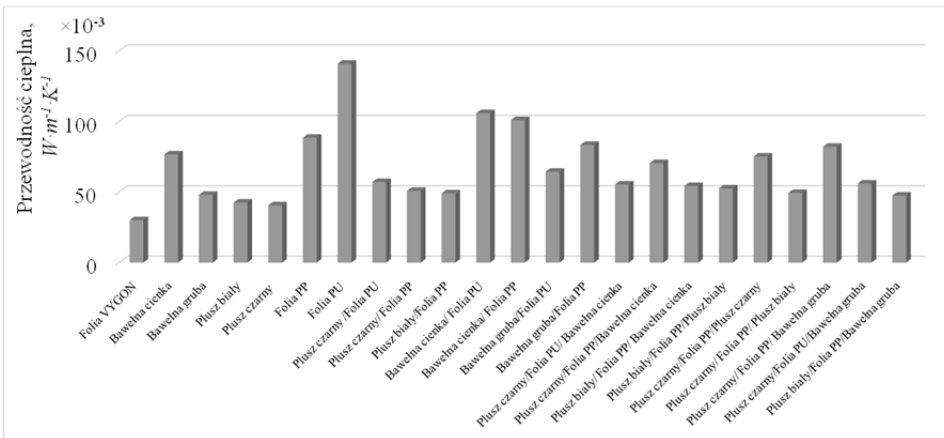
Rys. 100. Ilustracja zmian oporu pary wodnej wyznaczonego wg normy PN-EN ISO 11092 2014-11 [31] dla laminatów i ich składowych

Źródło: opracowanie własne.



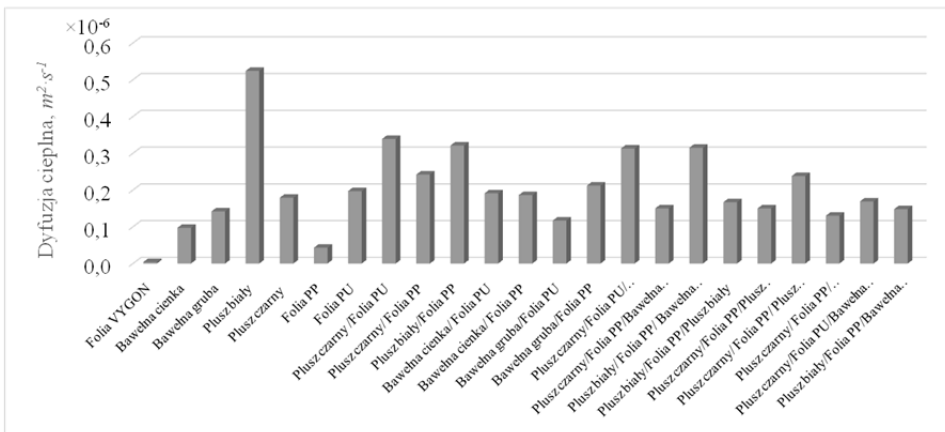
Rys. 101. Ilustracja zmian przepuszczalności pary wodnej wyznaczonej wg normy PN-EN 13726-2:2006 [126] dla laminatów i ich składowych

Źródło: opracowanie własne.

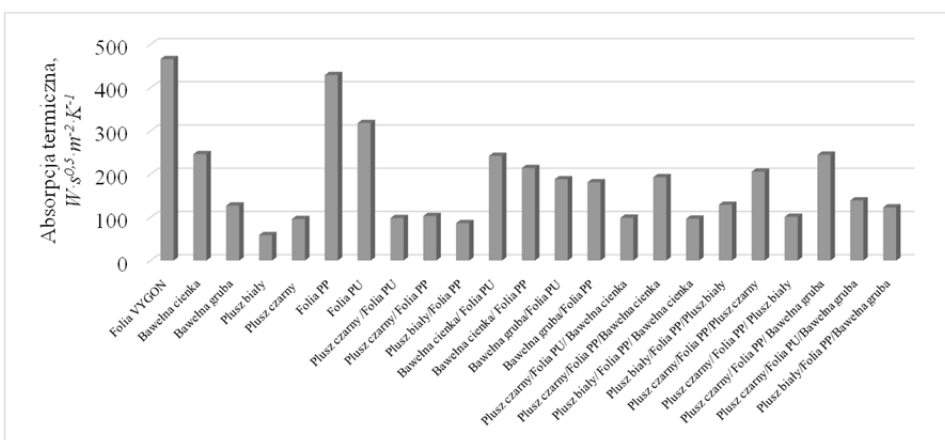


Rys. 102. Ilustracja zmian przewodności cieplnej wyznaczonej przy użyciu przyrządu Alambeta dla laminatów i ich składowych

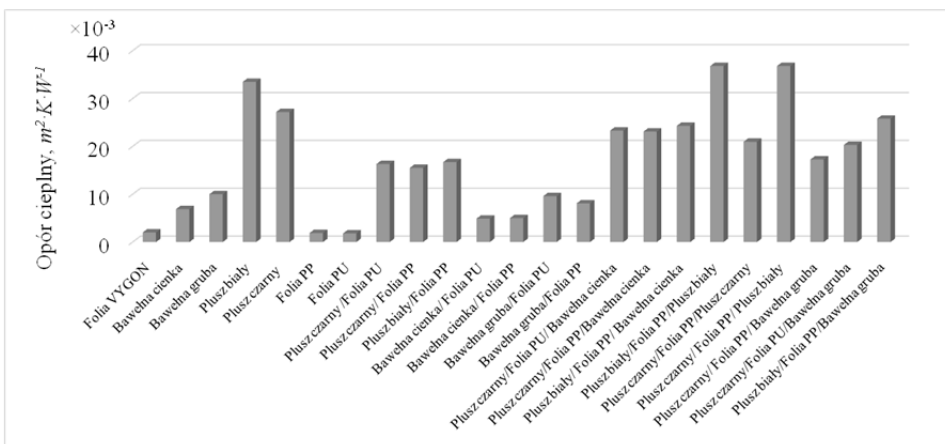
Źródło: opracowanie własne.



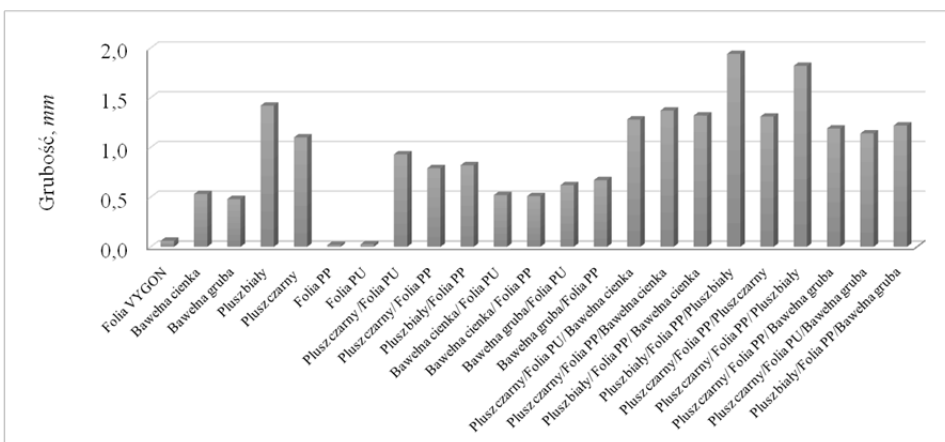
Rys. 103. Ilustracja zmian dyfuzji cieplnej wyznaczonej przy użyciu przyrządu Alambeta dla laminatów i ich składowych  
 Źródło: opracowanie własne.



Rys. 104. Ilustracja zmian absorpcji termicznej wyznaczonej przy użyciu przyrządu Alambeta dla laminatów i ich składowych  
 Źródło: opracowanie własne.

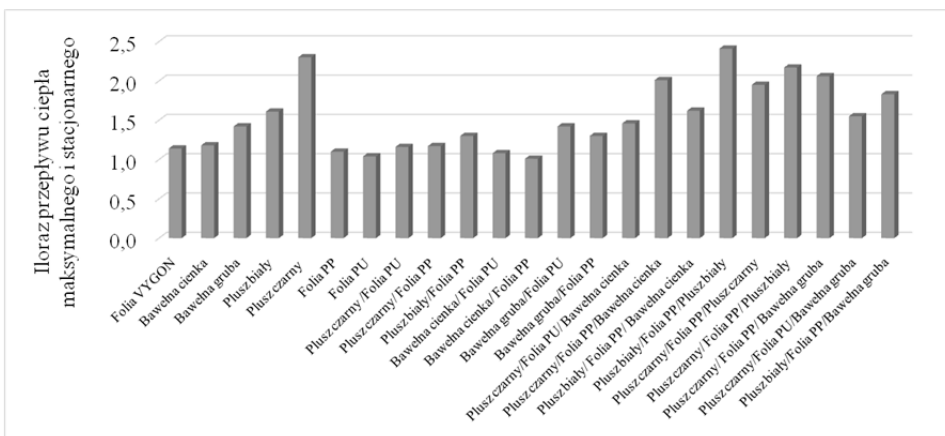


Rys. 105. Ilustracja zmian oporu cieplnego wyznaczonego przy użyciu przyrządu Alambeta dla laminatów i ich składowych  
 Źródło: opracowanie własne.



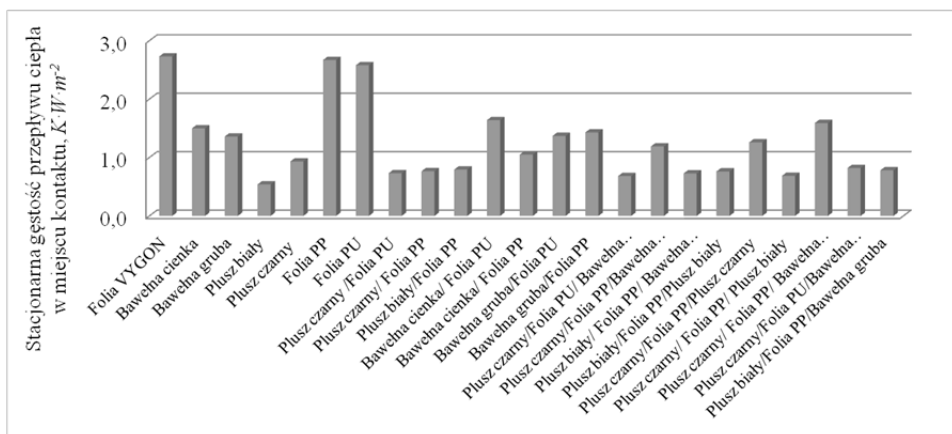
Rys. 106. Ilustracja zmian grubości wyznaczonej przy użyciu przyrządu Alambeta dla laminatów i ich składowych  
 Źródło: opracowanie własne.





Rys. 107. Ilustracja zmian ilorazu ciepła maksymalnego do stacjonarnego wyznaczonego przy użyciu przyrządu Alambeta dla laminatów i ich składowych

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 108. Ilustracja zmian stacjonarnej gęstości przepływu ciepła wyznaczonej przy użyciu przyrządu Alambeta dla laminatów i ich składowych

Źródło: opracowanie własne.

### 2.6.3. Wnioski wynikające z analizy właściwości biofizycznych wytworzonych wariantów dzianin

Analizując wyniki badań komfortu biofizycznego oraz komfortu sensorycznego wszystkich wytworzonych wariantów dzianin w liczbie 29 układów warstwowych, 16 układów warstwowych zawierających folię paroprzepuszczalną oraz 7 układów dzianin komercyjnych stwierdzono, że wprowadzenie foli paroprzepuszczalnej ma istotny wpływ na opór cieplny oraz opór pary wodnej badanych materiałów. Komfort biofizyczny jest określany właściwościami odzieży, które decydują o zachowaniu równowagi bilansu cieplnego, a więc o regulacji

temperatury i transportu wilgoci pomiędzy organizmem człowieka a otoczeniem. Komfort sensoryczny związany jest z mechanicznymi właściwościami wyrobu i opisywany jest kompletnym wskaźnikiem zwanym chwytem. Ma on związek z pobudzeniem sensorów dotyku rozmieszczonych na naszym ciele w wyniku zaistnienia kontaktu pomiędzy skórą człowieka a materiałem, z którego wykonano odzież. Ocenę komfortu biofizycznego wytworzonych dzianin przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 11092:2014-11 „Tekstyliia – Właściwości fizjologiczne – Pomiar oporu cieplnego i oporu pary wodnej w warunkach stanu ustalonego (metoda pocącej się zaizolowanej cieplnie płyty)” [31] oraz przy użyciu przyrządu Alambeta. Ocena właściwości biofizycznych została uzupełniona o ocenę komfortu sensorycznego i dokonana z wykorzystaniem przyrządu o nazwie Kawabata Evaluation System. Analizując wyniki badań właściwości biofizycznych wytworzonych wariantów prób materiałów należy pamiętać, że nie da się w sposób bezpośredni porównać wyników badań oporu cieplnego uzyskanych metodą pocącej się zaizolowanej cieplnie płyty oraz przyrządu Alambeta. Związane jest to z faktem, że przyrząd Alambeta wykorzystuje zjawisko ustalonej wymiany ciepła metodą dwupłytkową w warunkach otoczenia na drodze przewodzenia, zaś metoda pocącej się zaizolowanej cieplnie płyty wymaga warunków ustalonych ( $20^{\circ}\text{C}$ , 65%), jest metodą jednopłytkową z przepływem powietrza nad powierzchnią próbki z prędkością na poziomie  $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Wymiana ciepła realizowana jest głównie przez konwekcję. Pomiar izolacyjności cieplnej z zastosowaniem manekina termicznego w przeciwieństwie do dwóch powyższych metod wykorzystywany jest do wyrobów gotowych, a nie płaskich. Związane jest to z faktem, że wyroby gotowe nie przylegają do manekina tak dokładnie jak wyroby płaskie w metodach płytowych. Najwyższym oporem cieplnym wyznaczonym przy użyciu pocącej się zaizolowanej cieplnie płyty ( $0,0658\text{ m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$ ), jak i przy użyciu przyrządu Alambeta ( $0,0368\text{ m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$ ) charakteryzowała się dzianina warstwowa oznaczona Plusz biały/FoliaPP/Plusz biały. Opór pary wodnej dla tego wariantu był również najwyższy ze wszystkich badanych prób i wynosił  $881,165\text{ m}^2\text{KW}^{-1}$ . Przy doborze optymalnych właściwości biofizycznych układów materiałowych kierowano się materiałem odniesienia w postaci obecnie stosowanego ubrania w postaci folii polietylenowej o nazwie handlowej VYGON i masie powierzchniowej  $57,83\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ . Jako kryterium wyboru konstrukcji materiałowej przyjęto osiągnięcie wartości oporu pary wodnej opracowanego ubrania na poziomie zapewnionym przez ubranie wykonane z folii VYGON oraz osiągnięcie izolacyjności cieplnej wyższej niż dla ubrań z folii VYGON przy zachowaniu najwyższej wartości THV charakteryzującej chwyty. Z tego punktu widzenia za optymalną przyjęto konstrukcję układu warstwowego płaskiego wyrobu włókienniczego oznaczonego symbolem Plusz biały/Folia PP/Plusz biały, który charakteryzował się ponad dziesięciokrotnie większą wartością oporu cieplnego w stosunku do folii polietylenowej o symbolu VYGON. Dla niemowlaków z wykształconą warstwą rogową proponuje się stosowanie dzianin dwuwarstwowych o zmniejszonym oporze pary wodnej i dobrej izolacyjności cieplnej. Jako optymalny wariant uznano następujący układ materiałowy: warstwa kon-

duktywno-dyfuzyjna wykonana z przędzy poliestrowej o masie liniowej 150 dtex/£256x1, a warstwa sorpcyjna wykonana z przędzy o masie liniowej 20 tex, której tworzywem jest celuloza regenerowana z pulpy bambusowej, masa powierzchniowa dzianiny wynosi 221,87  $g \cdot m^{-2}$ . Wariant ten charakteryzował się oporem cieplnym na poziomie 0,025  $m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$  i oporem pary wodnej na poziomie 2,458  $m^2 \cdot Pa \cdot W^{-1}$ .

## **2.7. Ocena wytworzonych wariantów odzieży dla noworodków z zastosowaniem omawianych płaskich wyrobów włókienniczych**

Od wielu lat na świecie trwają prace związane z badaniami oporu cieplnego pościeli szpitalnej za pomocą manekinów termicznych dzieci [129, 130]. Naukowcy z University of Picardie Jules Verne prowadzili badania związane z oceną różnic izolacyjności cieplnej nagich noworodków oraz z założoną czapką i ubranych, używając manekina termicznego, który symulował zachowanie się noworodka o niskiej masie urodzeniowej. Badania doświadczalne przeprowadzono w zamkniętym inkubatorze w trzech różnych temperaturach (29°C, 32°C i 34°C). Wyniki przeprowadzonego eksperymentu wskazują, że założenie czapki na manekina termicznego spowodowało obniżenie utraty ciepła średnio o 18,9%. Naukowcy wskazali, że zjawisko to może być źródłem przegrzania mózgu noworodków. Sugerują więc, że dzieci pozostawione w inkubatorze powinny mieć okryte ciało i odkrytą głowę. Wyjątek stanowią dzieci z hipotermią, u których należy osiągnąć równowagę termiczną.

Dane literaturowe oraz informacje otrzymane w Klinice Neonatologii CZMP wskazują, że wyższa temperatura otoczenia oraz wyższa jego wilgotność w inkubatorze obniżają śmiertelność noworodków z niską masą urodzeniową. Parametry te wpływają na utrzymanie prawidłowej termoregulacji, która jest kluczowym elementem opieki nad dziećmi urodzonymi przedwcześnie. Utrata ciepła przez parowanie jest procesem pochłaniającym energię, wywołanym przez parowanie wody ze skóry lub błon śluzowych. Wyparowanie każdego grama wody powoduje utratę ok. 0,58 *kcal*, co równa się ok. 20 *W* ciepła. Skóra wcześniaka ma niedorozwiniętą warstwę rogową, co powoduje istotny wzrost przelnaskórkowej utraty wody oraz zmniejszanie jej możliwości ochronnych [131]. Przedstawione zjawiska stanowiły podstawę podjętych przez autorów badań, celem których było określenie wpływu składu surowcowego materiałów przeznaczonych na odzież dla wcześniaków, na izolacyjność cieplną i opór pary wodnej podczas użytkowania w warunkach inkubatoryjnych i pozainkubatoryjnych. Aby wypełnić cel podjętej pracy, zbudowano manekin termiczny o wymiarach wcześniaków. Manekin ten jest nowym innowacyjnym przyrządem umożliwiającym ocenę właściwości użytkowych odzieży. Manekiny o wymiarach dzieci do tej pory umożliwiały jedynie pomiar izolacyjności cieplnej w warunkach suchego transportu strumienia ciepła [132-134]. Rozwiązanie zastosowane przez autorów pozwala również na symulację utraty wody przez dziecko przedwcześnie urodzone.

### 2.7.1. Charakterystyka manekina termicznego

Ocena właściwości termoizolacyjnych odzieży dla wcześniaków została przeprowadzona przy użyciu manekina termicznego dziecka urodzonego przedwcześnie wraz z funkcją wydzielania wilgoci w poszczególnych jego strefach anatomicznych (rysunek 109). Manekin ten zostały wykonany przez firmę ATT Władysław Tarnowski, zgodnie z założeniami i wytycznymi autorów projektu.



Rys. 109. Manekin termiczny dziecka urodzonego przedwcześnie wraz z funkcją wydzielania wilgoci w poszczególnych jego strefach anatomicznych

Źródło: opracowanie własne.

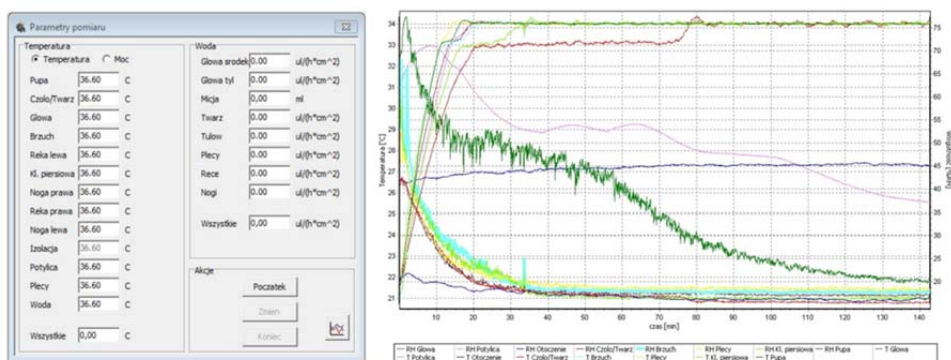
Model manekina odpowiada wielkości i proporcjom ciała dziecka o masie urodzeniowej około 1500 g. Wymiary manekina zostały ustalone w oparciu o rzeczywiste wymiary dzieci przedwcześnie urodzonych w szpitalu Centrum Zdrowia Dziecka, na Oddziale Neonatologii w 2012 r. Najistotniejszą cechą proponowanego rozwiązania jest możliwość pełnego sterowania w sposób ciągły emisją wilgoci w zakresie wartości fizjologicznych. Powierzchnia łączna manekina wynosi  $1100\text{ cm}^2$ . Manekin składa się z 450 miniaturowych emiterów wilgoci (rysunek 110) usytuowanych w zewnętrznej polimerowej powłoce manekina imitującej skórę, sterowanych w siedmiu niezależnych strefach (głowa środek, głowa tył, twarz, tułów, plecy, ręce, nogi).



Rys. 110. Emitery wody znajdujące się na głowie manekina

Źródło: opracowanie własne.

Prędkość emisji wody jest regulowana w zakresie  $1-80 \mu\text{h}^{-1}\text{cm}^{-2}$ . Manekin ten składa się również z 11 niezależnych stref grzewczych: twarzy, głowy, potylicy, klatki piersiowej, brzucha, pleców, pupy, ręki lewej, ręki prawej, nogi lewej, nogi prawej. Każda ze stref jest sterowana osobno za pomocą programu komputerowego (rysunek 111), co daje możliwość ustawienia różnych temperatur oraz różnego poziomu wydzielania wilgoci w poszczególnych strefach pomiarowych. Związane jest to z faktem, że niemowlę, podobnie jak człowiek dorosły, w różnych częściach ciała wydziela inne ilości potu. Dodatkowo manekin został wyposażony w funkcję mikcji, gdyż uznano, że oddawanie moczu przez dziecko może również wpływać na jego komfort biofizyczny i termoregulację.



Rys. 111. Okno parametrów pomiaru dla manekina dziecka przedwcześnie urodzonego  
Źródło: opracowanie własne.



Fantom ma możliwość pracy w temperaturze otoczenia od  $10^{\circ}\text{C}$  do  $44^{\circ}\text{C}$  i wilgotności od 20% do 90%. Ze względu na konieczność symulowania zarówno warunków otoczenia, jak i warunków inkubacyjnych manekin został umieszczony w komorze wielkogabarytowej, która umożliwi kontrolę warunków klimatycznych w zakresie temperatury od  $-20^{\circ}\text{C}$  do  $+50^{\circ}\text{C}$ , wilgotności względnej powietrza w zakresie 10%-90% (dla temperatur punktu rosy od  $+5^{\circ}\text{C}$  do  $+50^{\circ}\text{C}$ ), prędkości przepływu powietrza w granicach  $0,15 \div 1,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . W ramach konsultacji z prof. E. Gulczyńską z Centrum Zdrowia Matki Polki ustalono następujące warunki klimatyczne, w których przeprowadzono badania właściwości biofizycznych odzieży dla wcześniaków. W warunkach inkubacyjnych badania należy prowadzić przy temperaturze otoczenia  $32^{\circ}\text{C}$  i wilgotności powietrza równej 58%. W warunkach poza inkubatorem temperatura otoczenia powinna wynosić  $20^{\circ}\text{C}$ , a wilgotność powietrza 50%. Badania przeprowadzono w obu przypadkach przy prędkości przepływu powietrza wynoszącej  $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Program komputerowy umożliwił sterowanie strumieniem cieplnym tak, iż temperatura każdej ze stref manekina była stała i wynosiła  $34^{\circ}\text{C}$ . W trakcie pomiaru monitorowane były warunki zewnętrzne i temperatura każdej ze stref. Ocena własności termoizolacyjnych ubiorów dokonana została w warunkach ustalone-







go przepływu strumienia ciepła na podstawie analizy parametrów termicznych środowiska zewnętrznego i mikroklimatu pododzieżowego oraz parametrów związanych z ilością wydzielanej wilgoci i temperatury manekina.

### 2.7.2. Wyniki badań właściwości biofizycznych odzieży dla wcześniaków

Na podstawie wielkości wskaźników odczytywanych w trakcie pomiaru z poszczególnych stref anatomicznych manekina ze wzoru (71) obliczono wartość izolacyjności cieplnej kompletu odzieży dla niemowląt. Następnie z wzoru (74) obliczona została wartość efektywnej izolacyjności cieplnej. W tabeli 59 zestawiono wartości średnie całkowitej i efektywnej izolacyjności cieplnej wyznaczonej w warunkach suchego przepływu strumienia ciepła obliczone z 5 powtórzeń pomiarów. Warunki prowadzenia badań były następujące: temperatura manekina 35°C, temperatura otoczenia 32°C, wilgotność względna powietrza 58%. Warunki prowadzenia badań były wynikiem konsultacji z Oddziałem Neonatologii Centrum Zdrowia Matki Polki oraz klimatem panującym w inkubatorach. W tabeli 60 przedstawiono średnie wartości izolacyjności cieplnej i oporów pary wodnej obliczone z 5 powtórzeń pomiarów przeprowadzonych dodatkowo w warunkach pocącego się manekina z intensywnością  $3,2 \mu l \cdot h^{-1} \cdot cm^{-2}$ .

Tabela 59. Wartości średnie izolacyjności cieplnej odzieży z laminatów i jej komercyjnych odnośników wyznaczone dla warunków inkubatoryjnych przy suchym przepływie strumienia ciepła

Zdjęcie	Materiał	Układ	Całkowita izolacyjność cieplna (manekin + ubranie)	Efektywna izolacyjność cieplna (ubranie po odjęciu izolacyjności cieplnej manekina)	Efektywna izolacyjność cieplna (ubranie po odjęciu izolacyjności cieplnej manekina oraz wyłączeniu z pomiarów nóg, które nie były pokryte materiałem)
			$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$	$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$	$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$
	Manekin nagi	Manekin nagi	0,102		
	Folia VYGON	Folia VYGON	0,181	0,053	0,058 (w tym przypadku wyłączona z pomiaru była głowa, gdyż nie była pokryta folią)

	Plusz czarny/ Folia PP/ Bawełna cienka	Body, czapka, rękawiczki, buciki	0,174	0,047	0,084
	Plusz czarny/ Folia PP/ Plusz czarny	Body, czapka, rękawiczki, buciki	0,207	0,084	0,132
	Plusz czarny/ Folia PP/ Bawełna gruba	Body, czapka, rękawiczki, buciki	0,208	0,088	0,130
	Plusz biały/ Folia PP/ Plusz biały	Body, czapka, rękawiczki, buciki	0,191	0,062	0,102
	Plusz biały/ Folia PP/ Bawełna gruba	Body, czapka, rękawiczki, buciki	0,191	0,071	0,113
	Plusz biały/ Folia PP/ Bawełna cienka	Body, czapka, rękawiczki, buciki	0,174	0,056	0,086


	Plusz czarny/ Folia PP/ Plusz czarny	Worek	0,233	0,100	0,158
	Plusz czarny/ Folia PP/ Bawełna gruba	Worek	0,222	0,086	0,136
	Ubranie komercyjne 1, 100% bawełna	Body, czapka, rękawiczki	0,139	0,022	0,040
	Ubranie komercyjne 2, 100% bawełna	Body, czapka, rękawiczki	0,134	0,022	0,044
	Ubranie komercyjne 3, 100% bawełna	Body, czapka, rękawiczki	0,141	0,028	0,043

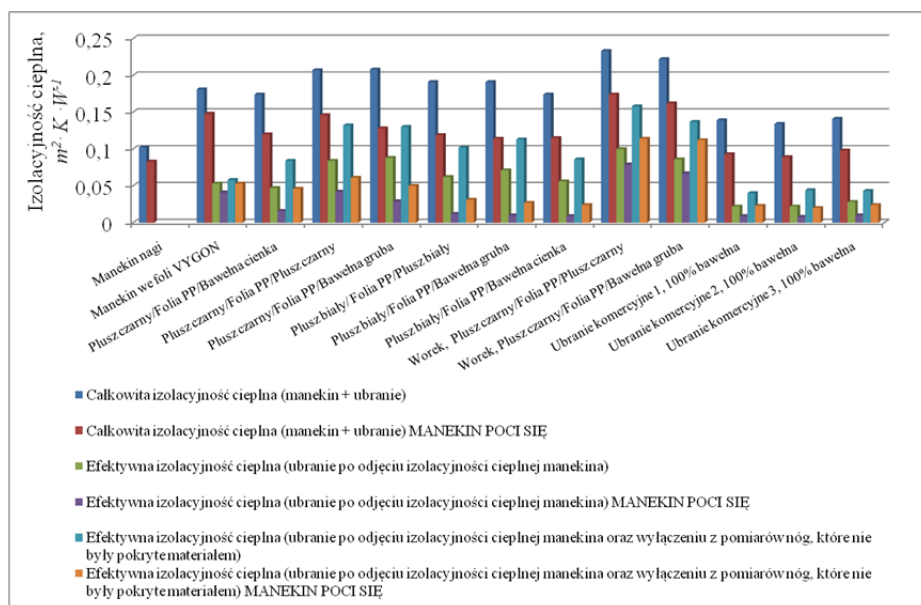


Tabela 60. Wartości średnie izolacyjności cieplnej i oporów pary wodnej dla odzieży uszytej z wykorzystaniem laminatów i odnośników komercyjnych w warunkach wilgotnego przepływu strumienia ciepła (pocącego się manekina)

Materiał	Układ	Całkowita izolacyjność cieplna	Efektywna izolacyjność cieplna	Efektywna izolacyjność cieplna z wyłączeniu z pomiarów nóg	Całkowity opór pary wodnej	Efektywny opór pary wodnej	Efektywny opór pary wodnej z wyłączeniu z pomiarów nóg,
		$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$	$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$	$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$	$m^2 \cdot Pa \cdot W^{-1}$	$m^2 \cdot Pa \cdot W^{-1}$	$m^2 \cdot Pa \cdot W^{-1}$
Manekin nagi	Manekin nagi	0,083			71,190		
Folia VYGON	Folia	0,148	0,041	0,053 (wyłączona z pomiaru była głowa, gdyż nie była pokryta folią)	135,358	64,170	64,777 (wyłączona z pomiaru była głowa, gdyż nie była pokryta folią)
Plusz czarny/ Folia PP/ Bawełna cienka	Body, czapka, rękawiczki, buciki	0,120	0,016	0,046	103,545	32,357	32,964
Plusz czarny/ Folia PP/ Plusz czarny	Body, czapka, rękawiczki, buciki	0,146	0,042	0,061	126,294	55,107	55,714
Plusz czarny/ Folia PP/ Bawełna gruba	Body, czapka, rękawiczki, buciki	0,128	0,029	0,050	110,557	39,370	39,976
Plusz biały/ Folia PP/ Plusz biały	Body, czapka, rękawiczki, buciki	0,119	0,012	0,031	102,312	31,124	31,731
Plusz biały/ Folia PP/ Bawełna gruba	Body, czapka, rękawiczki, buciki	0,114	0,010	0,027	97,777	26,590	27,196

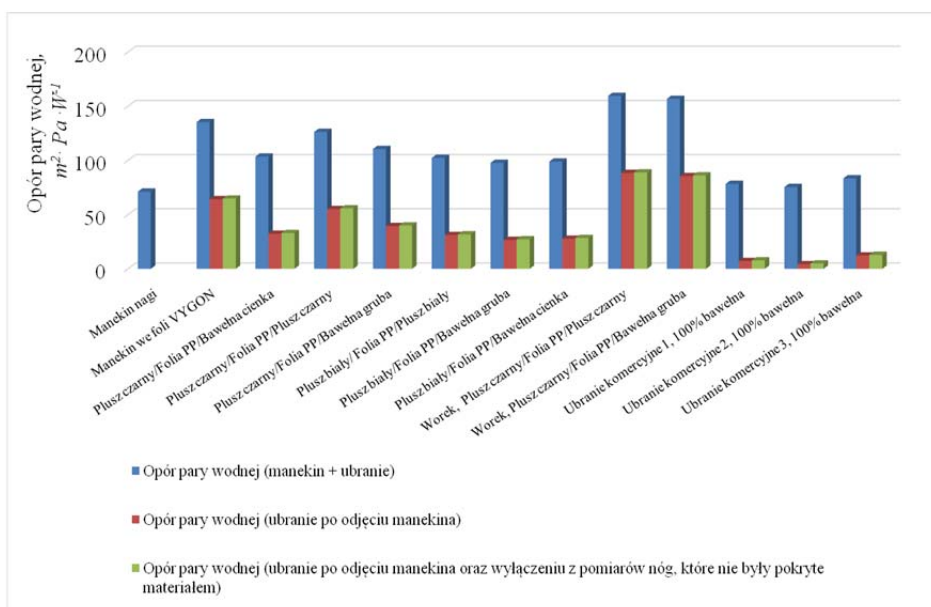
Materiał	Układ	Całkowita izolacyjność cieplna	Efektywna izolacyjność cieplna	Efektywna izolacyjność cieplna z wyłączeniu z pomiarów nóg	Całkowity opór pary wodnej	Efektywny opór pary wodnej	Efektywny opór pary wodnej z wyłączeniu z pomiarów nóg,
		$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$	$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$	$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$	$m^2 \cdot Pa \cdot W^{-1}$	$m^2 \cdot Pa \cdot W^{-1}$	$m^2 \cdot Pa \cdot W^{-1}$
Plusz biały/ Folia PP/ Bawełna cienka	Body, czapka, rękawiczki, buciki	0,115	0,009	0,024	98,932	27,745	28,352
Plusz czarny/ Folia PP/ Plusz czarny	Worek	0,174	0,079	0,114	159,518	88,3308	88,9374
Plusz czarny/ Folia PP/ Bawełna gruba	Worek	0,162	0,067	0,112	156,769	85,581	86,190
Ubranie komercyjne 1, 100% bawełna	Body, czapka, rękawiczki	0,093	0,009	0,023	78,35	7,16	7,77
Ubranie komercyjne 2, 100% bawełna	Body, czapka, rękawiczki	0,089	0,008	0,020	75,47	4,29	4,90
Ubranie komercyjne 3, 100% bawełna	Body, czapka, rękawiczki	0,098	0,010	0,024	83,38	12,20	12,81

Uzyskane wyniki w celach porównawczych zilustrowano na rysunkach 112-113. Wyniki badań odzieży wytworzonej z dzianin konduktywno-dyfuzyjnych i laminatów do użytkowania w warunkach poza inkubatorem przy przepływie suchego strumienia ciepła zestawiono w tabeli 61, a wyniki obliczone w warunkach pocącego się manekina zestawiono w tabeli 62. Badania przeprowadzono w następujących warunkach: temperatura manekina 35°C, temperatura otoczenia 20°C, wilgotność powietrza 50%. W warunkach pocącego się manekina wydatek wilgoci wynosił  $3,2 \mu l \cdot h^{-1} \cdot cm^{-2}$ .



Rys. 112. Zestawienie zależności izolacyjności cieplnej dla manekina w warunkach suchego strumienia ciepła i pocącego się manekina

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 113. Ilustracja zmian oporu pary wodnej odzieży wytworzonej z laminatów i ich odnośników komercyjnych badanej w warunkach inkubatoryjnych

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 61. Wyniki średniej wartości całkowitej izolacyjności cieplnej i efektywnej izolacyjności cieplnej w warunkach przepływu suchego strumienia ciepła w warunkach poza inkubatorem

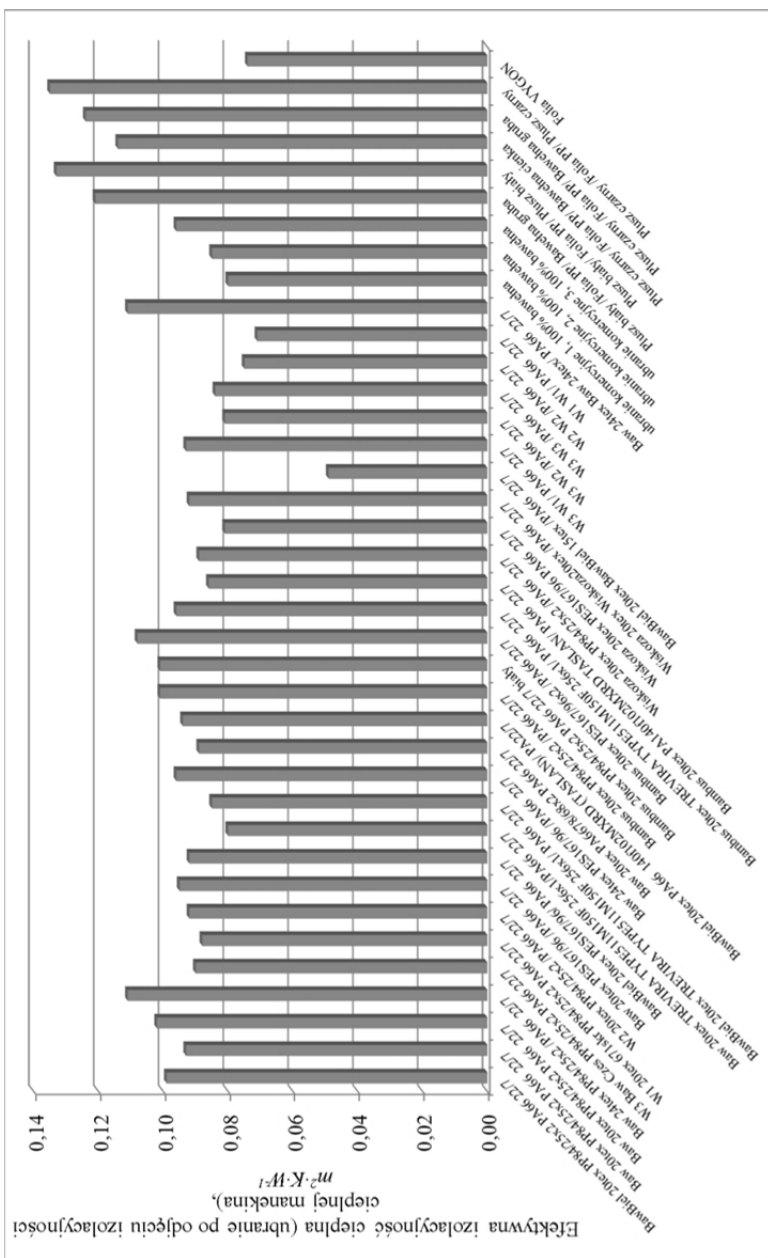
Wariant próby	Układ	Całkowita izolacyjność cieplna	Efektywna izolacyjność cieplna
		$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$	$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$
Manekin nagi	Manekin nagi	0,093	
BawBiel 20 tex PP 84 dtex/f25x2/ PA66 22 dtex/f7	Pajacyk, czapka, rękawiczki	0,192	0,099
Baw 20 tex PP 84 dtex/f25x2/ PA66 22 dtex/f7	Pajacyk, czapka, rękawiczki	0,186	0,093
Baw 24 tex PP 84 dtex/f25x2/ PA66 22 dtex/f7	Pajacyk, czapka, rękawiczki	0,195	0,102
W1 20 tex 671skr PP 84 dtex/f25x2/ PA66 22 dtex/f7	Pajacyk, czapka, rękawiczki	0,204	0,111
W2 20 tex PP 84 dtex/f25x2/ PA66 22 dtex/f7	Pajacyk, czapka, rękawiczki	0,183	0,09
Baw 20 tex PES 167 dtex/f96 PA66 22 dtex/f7	Pajacyk, czapka, rękawiczki	0,181	0,088
BawBiel 20 tex PES 167 dtex/f96/ PA66 22 dtex/f7	Pajacyk, czapka, rękawiczki	0,185	0,092
BawBiel 20 tex PES TREVIRA 150 dtex/f256x1/PA66 22 dtex/f7	Pajacyk, czapka, rękawiczki	0,188	0,095
Baw 24 tex PES 167 dtex/f96 PA66 22 dtex/f7	Pajacyk, czapka, rękawiczki	0,185	0,092
Baw 20 tex PA66 78 dtex/f68x2/ PA66 22 dtex /f7	Pajacyk, czapka, rękawiczki	0,173	0,08
BawBiel 20 tex PA66 140 dtex/f102 (TASLAN)/PA66 22 dtex/f7	Pajacyk, czapka, rękawiczki	0,178	0,085
Bambus 20 tex PP 84 dtex/f25x2/ PA66 22 dtex/f7 biały	Pajacyk, czapka, rękawiczki	0,189	0,096

Wariant próby	Układ	Całkowita izolacyjność cieplna	Efektywna izolacyjność cieplna
		$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$	$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$
Bambus 20 tex PES 167 dtex/f96/ PA66 22 dtex/f7	Pajacyk, czapka, rękawiczki	0,182	0,089
Bambus 20 tex PES TREVIRA 150 dtex/f256x1/ PA66 22 dtex/f7	Pajacyk, czapka, rękawiczki	0,187	0,094
Bambus 20 tex PA66 140 dtex/f102 TASLAN/PA66 22 dtex/f7	Pajacyk, czapka, rękawiczki	0,194	0,101
Wiskoza 20 tex PP 84 dtex/f25x2/ PA66 22 dtex/f7	Pajacyk, czapka, rękawiczki	0,194	0,101
Wiskoza 20 tex PES 167 dtex/f96/ PA66 22 dtex/f7	Pajacyk, czapka, rękawiczki	0,201	0,108
Wiskoza 20 tex Wiskoza 20 tex/ PA66 22 dtex/f7	Pajacyk, czapka, rękawiczki	0,189	0,096
BawBiel 20 tex BawBiel 15 tex/ PA66 22 dtex/f7	Pajacyk, czapka, rękawiczki	0,179	0,086
W3 W1/PA66 22 dtex/f7	Pajacyk, czapka, rękawiczki	0,182	0,089
W3 W2/PA66 22 dtex/f7	Pajacyk, czapka, rękawiczki	0,174	0,081
W3 W3/PA66 22 dtex/f7	Pajacyk, czapka, rękawiczki	0,185	0,092
W2 W2/PA66 22 dtex/f7	Pajacyk, czapka, rękawiczki	0,142	0,049
W1 W1/PA66 22 dtex/f7	Pajacyk, czapka, rękawiczki	0,186	0,093

Wariant próby	Układ	Całkowita izolacyjność cieplna	Efektywna izolacyjność cieplna
		$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$	$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$
Baw 24 tex Baw 24 tex/PA66 22 dtex/f7	Pajacyk, czapka, rękawiczki	0,174	0,081
Ubranie komercyjne 1, 100% bawełna	Pajacyk, czapka, rękawiczki	0,177	0,084
Ubranie komercyjne 2, 100% bawełna	Pajacyk, czapka, rękawiczki	0,168	0,075
Ubranie komercyjne 3, 100% bawełna	Pajacyk, czapka, rękawiczki	0,164	0,071
Plusz biały/Folia PP/Bawełna cienka	Pajacyk, czapka, rękawiczki	0,204	0,111
Plusz biały/Folia PP/Bawełna gruba	Pajacyk, czapka, rękawiczki	0,214	0,121
Plusz biały/Folia PP/Plusz biały	Pajacyk, czapka, rękawiczki	0,226	0,133
Plusz czarny/Folia PP/Bawełna cienka	Pajacyk, czapka, rękawiczki	0,207	0,114
Plusz czarny/Folia PP/Bawełna gruba	Pajacyk, czapka, rękawiczki	0,217	0,124
Plusz czarny/Folia PP/Plusz czarny	Pajacyk, czapka, rękawiczki	0,228	0,135
Folia VYGON	worek	0,167	0,074

W celu przeprowadzenia analizy porównawczej otrzymane wyniki przedstawiono na rysunkach 114-115.





Rys. 115. Zestawienie wartości efektywnej izolacyjności cieplnej przy suchym przepływie strumienia ciepła dla odzieży wykonanej z dzianin wielowarstwowych i dzianin komercyjnych

Źródło: opracowanie własne.



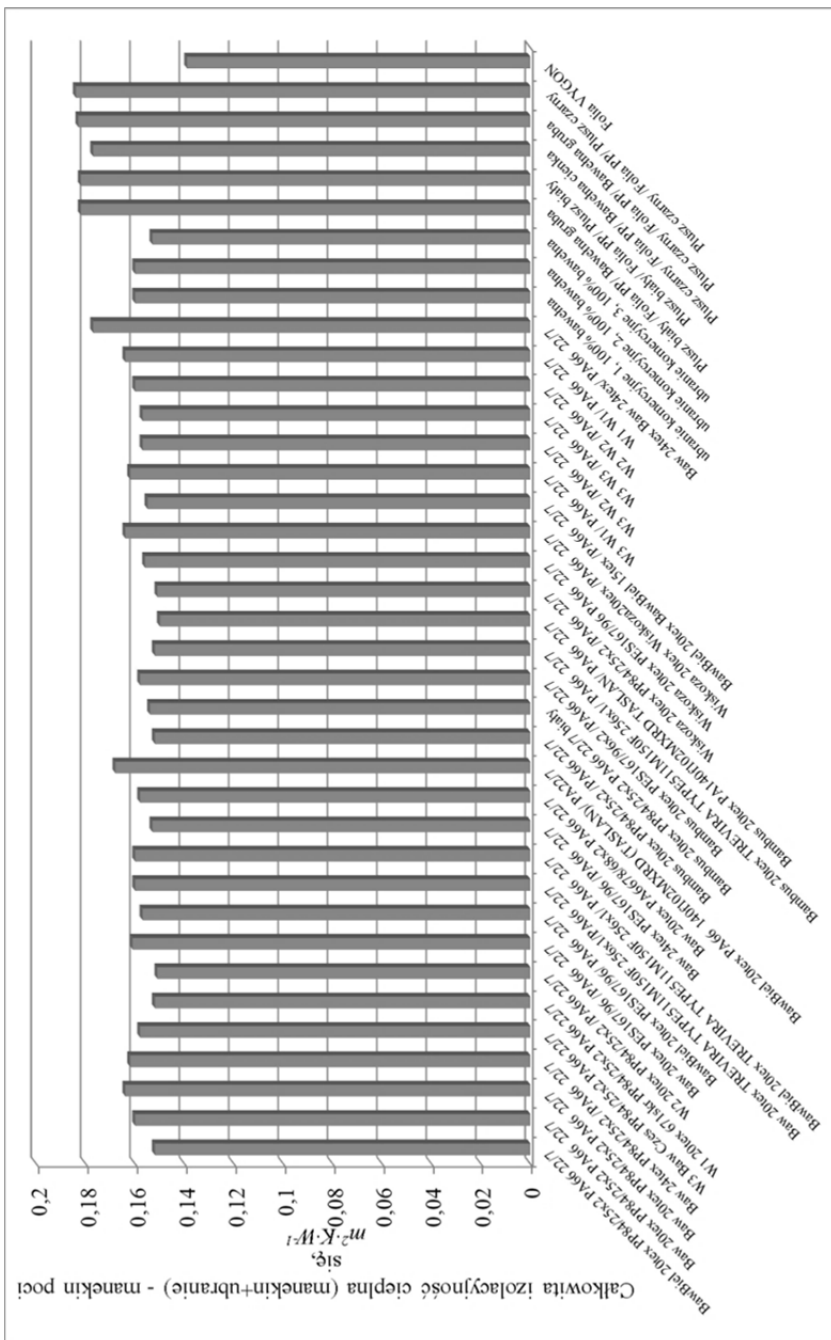
Tabela 62. Wyniki badań właściwości biofizycznych odzieży dla niemowlaków przy użyciu pocącego się manekina, przeprowadzonych w warunkach klimatycznych poza inkubatorem: temperatura otoczenia 20°C, wilgotność powietrza 50%

Wariant próby	Układ	Całkowita izolacyjność	Efektywna izolacyjność cieplna	Całkowity opór pary wodnej	Efektywny opór pary wodnej
		$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$	$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$	$m^2 \cdot Pa \cdot W^{-1}$	$m^2 \cdot Pa \cdot W^{-1}$
Manekin nagi	Manekin nagi	0,088		45,751	
BawBiel 20 tex PP 84 dtex/f25x2/ PA66 22 dtex/f7	Pajacyk, czapka, rękawiczki	0,152	0,060	61,738	15,987
Baw 20 tex PP 84 dtex/f25x2/ PA66 22 dtex/f7	Pajacyk, czapka, rękawiczki	0,160	0,059	65,162	19,411
Baw 24 tex PP 84 dtex/f25x2/ PA66 22 dtex/f7	Pajacyk, czapka, rękawiczki	0,164	0,055	66,850	21,099
W1 20 tex 671skr PP 84 dtex/f25x2/ PA66 22 dtex/f7	Pajacyk, czapka, rękawiczki	0,162	0,060	65,962	20,211
W2 20 tex PP 84 dtex/f25x2/ PA66 22 dtex/f7	Pajacyk, czapka, rękawiczki	0,158	0,062	64,334	18,583
Baw 20 tex PES 167 dtex/f96 PA66 22 dtex/f7	Pajacyk, czapka, rękawiczki	0,152	0,037	61,752	16,002
BawBiel 20 tex PES 167 dtex/f96/ PA66 22 dtex/f7	Pajacyk, czapka, rękawiczki	0,151	0,047	61,347	15,596
BawBiel 20 tex PES TREVIRA 150 dtex/f256x1/ PA66 22 dtex/f7	Pajacyk, czapka, rękawiczki	0,161	0,061	65,832	20,081
Baw 24 tex PES 167 dtex/f96 PA66 22 dtex/f7	Pajacyk, czapka, rękawiczki	0,157	0,061	63,977	18,226
Baw 20 tex PA66 78 dtex/f68x2/ PA66 22 dtex /f7	Pajacyk, czapka, rękawiczki	0,160	0,065	65,214	19,463
BawBiel 20 tex PA66 140 dtex/f102 (TASLAN)/PA66 22 dtex/f7	Pajacyk, czapka, rękawiczki	0,160	0,044	65,193	19,442
Bambus 20 tex PP 84 dtex/f25x2/ PA66 22 dtex/f7 biały	Pajacyk, czapka, rękawiczki	0,153	0,056	62,206	16,455

Wariant próby	Układ	Całkowita izolacyjność	Efektywna izolacyjność cieplna	Całkowity opór pary wodnej	Efektywny opór pary wodnej
		$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$	$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$	$m^2 \cdot Pa \cdot W^{-1}$	$m^2 \cdot Pa \cdot W^{-1}$
Bambus 20 tex PES 167 dtex/f96/ PA66 22 dtex/f7	Pajacyk, czapka, rękawiczki	0,158	0,059	64,252	18,501
Bambus 20 tex PES TREVIRA 150 dtex/f256x1/ PA66 22 dtex/f7	Pajacyk, czapka, rękawiczki	0,168	0,065	68,520	22,769
Bambus 20 tex PA66 140 dtex/f102 TASLAN/PA66 22 dtex/f7	Pajacyk, czapka, rękawiczki	0,152	0,059	61,884	16,133
Wiskoza 20 tex PP 84 dtex/f25x2/ PA66 22 dtex/f7	Pajacyk, czapka, rękawiczki	0,154	0,059	62,662	16,911
Wiskoza 20 tex PES 167 dtex/f96/ PA66 22 dtex/f7	Pajacyk, czapka, rękawiczki	0,158	0,058	64,365	18,614
Wiskoza 20 tex Wiskoza 20 tex/ PA66 22 dtex/f7	Pajacyk, czapka, rękawiczki	0,152	0,053	61,799	16,0493
BawBiel 20 tex BawBiel 15 tex/ PA66 22 dtex/f7	Pajacyk, czapka, rękawiczki	0,150	0,047	60,921	15,170
W3 W1/PA66 22 dtex/f7	Pajacyk, czapka, rękawiczki	0,151	0,04	61,300	15,549
W3 W2/PA66 22 dtex/f7	Pajacyk, czapka, rękawiczki	0,156	0,059	63,543	17,793
W3 W3/PA66 22 dtex/f7	Pajacyk, czapka, rękawiczki	0,164	0,066	66,886	21,135
W2 W2/PA66 22 dtex/f7	Pajacyk, czapka, rękawiczki	0,155	0,065	67,112	21,361
W1 W1/PA66 22 dtex/f7	Pajacyk, czapka, rękawiczki	0,162	0,049	66,111	20,360

Wariant próby	Układ	Całkowita izolacyjność	Efektywna izolacyjność cieplna	Całkowity opór pary wodnej	Efektywny opór pary wodnej
		$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$	$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$	$m^2 \cdot Pa \cdot W^{-1}$	$m^2 \cdot Pa \cdot W^{-1}$
Baw 24 tex Baw 24 tex/ PA66 22 dtex/f7	Pajacyk, czapka, rękawiczki	0,157	0,040	63,751	17,999
Ubranie komercyjne 1, 100% bawełna	Pajacyk, czapka, rękawiczki	0,157	0,052	63,608	17,857
Ubranie komercyjne 2, 100% bawełna	Pajacyk, czapka, rękawiczki	0,160	0,058	65,181	19,430
Ubranie komercyjne 3, 100% bawełna	Pajacyk, czapka, rękawiczki	0,164	0,058	66,735	20,984
Plusz biały/ Folia PP/ Bawełna cienka	Pajacyk, czapka, rękawiczki	0,177	0,087	93,349	47,598
Plusz biały/ Folia PP/ Bawełna gruba	Pajacyk, czapka, rękawiczki	0,182	0,093	95,474	49,723
Plusz biały/ Folia PP/ Plusz biały	Pajacyk, czapka, rękawiczki	0,182	0,094	95,918	50,167
Plusz czarny/ Folia PP/ Bawełna cienka	Pajacyk, czapka, rękawiczki	0,177	0,089	92,839	47,088
Plusz czarny/ Folia PP/ Bawełna gruba	Pajacyk, czapka, rękawiczki	0,183	0,095	95,964	50,214
Plusz czarny/ Folia PP/ Plusz czarny	Pajacyk, czapka, rękawiczki	0,184	0,096	96,494	50,743
Folia VYGON	Worek	0,139	0,051	83,741	37,990

Dla celów porównawczych otrzymane wyniki zilustrowano na rysunkach 116-119.



Rys. 116. Zestawienie wyników pomiarów całkowitej izolacyjności cieplnej wyznaczanej przy użyciu pocągego się manekina dla ubiorów wykonanych z dzianin z warstwą konduktywno-dyfuzyjną i sorpcyjną oraz z laminatów

Źródło: opracowanie własne.







### 2.7.3. Wnioski wynikające z oceny laboratoryjnej ubrań dla dzieci przedwcześnie urodzonych

Informacje otrzymane w Klinice Neonatologii CZMP wskazują, że wyższa temperatura otoczenia oraz wyższa wilgotność wpływają na niższą śmiertelność noworodków z niską masą urodzeniową. Parametry te mają wpływ na utrzymanie prawidłowej termoregulacji, która jest kluczowym elementem opieki nad dziećmi urodzonymi przedwcześnie. Opracowane ubrania barierowe o konstrukcji warstwowej składające się z warstw dzianinowych i membran, w przyszłości mogą doprowadzić do obniżenia temperatury i wilgotności w inkubatorach, co na pewno ułatwi oddychanie dzieciom przedwcześnie urodzonym. Zadaniem membrany jest ograniczenie parowania wody ze skóry wcześniaka, a dzianiny zapewniają komfort termiczny i sensoryczny.

Na podstawie otrzymanych wyników badań empirycznych przedstawionych w rozdziale 2.6 dla wyrobów płaskich wytypowano warianty dzianin, z których przygotowano ubranka dla wcześniaków o optymalnych właściwościach komfortu biofizycznego. W dalszej kolejności przeprowadzono ocenę właściwości biofizycznych odzieży dla wcześniaków z wykorzystaniem manekina termicznego wcześniaka wraz z funkcją wydzielania wilgoci w poszczególnych jego strefach anatomicznych zgodnie z normą PN-EN ISO 15831:2006 „Odzież – Właściwości fizjologiczne – Pomiar izolacyjności cieplnej z zastosowaniem manekina termicznego” [32].

Przeprowadzona analiza badań w warunkach inkubatoryjnych wskazuje, iż zdecydowana większość opracowanych wariantów odzieży charakteryzuje się większą efektywną izolacyjnością cieplną przy suchym przepływie strumienia ciepła w stosunku do izolacyjności cieplnej wyrobu medycznego o nazwie VYGON. Należy zauważyć, iż wszystkie badane ubrania komercyjne wytworzone w 100% z bawełny posiadają wartość efektywnej izolacyjności cieplnej przy suchym przepływie ciepła na poziomie niższym niż wyrób medyczny VYGON. Największą efektywną izolacyjnością cieplną na poziomie  $0,084-0,100 \text{ m}^2 \text{KW}^{-1}$  charakteryzują się ubrania wykonane z eksperymentalnego układu wielowarstwowego o symbolu Plusz czarny/Folia PP/Plusz czarny i Plusz czarny/Folia PP/Bawełna gruba. Są one wyższe o około 88% w stosunku do efektywnej izolacyjności cieplnej wyrobu medycznego VYGON. Analiza wyników badań odzwierciedlających warunki rzeczywiste, to znaczy uwzględniająca proces pocenia się dziecka umieszczonego w inkubatorze wskazuje, iż wyniki te ulegają drastycznej zmianie. Dla większości wariantów eksperymentalnych wraz ze wzrostem wilgotności efektywna izolacyjność cieplna w warunkach przepływu wilgotnego strumienia ciepła maleje przy utrzymywaniu się stałej izolacyjności cieplnej wyrobu medycznego, w szczególności dotyczy to wariantów wytworzonych z udziałem włókien bawełny. Zdecydowany wpływ na wartości cieplne ma konstrukcja odzieży. Największą efektywną izolacyjność cieplną posiadają wyroby w kształcie worków. Przykładowo wyrób wytworzony z wariantu o symbolu Plusz czarny/Folia PP/Plusz czarny w postaci takiej jak



wyrób medyczny o symbolu Folia VYGON posiada prawie dwa razy większą efektywną izolacyjność cieplną w stosunku do wyrobu medycznego obecnie stosowanego, a jednocześnie zapewnia również większy o około 38% efektywny opór pary wodnej.

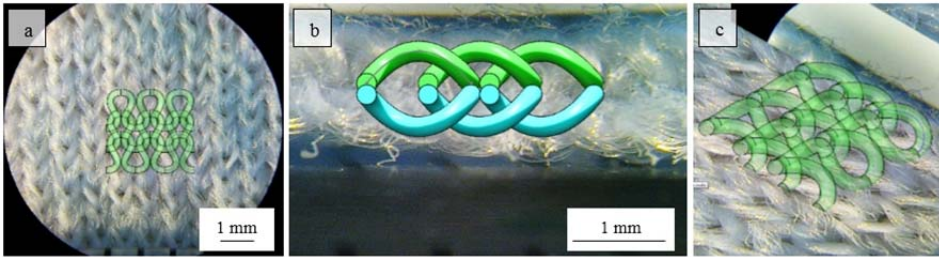
Przedstawione wyniki badań w tabeli 60 pozwalają w jednoznaczny sposób stwierdzić, że komercyjnie dostępne dzianiny oraz ubrania dla niemowląt nie spełniają stawianych w niniejszej monografii specyficznych wymagań dla dzieci przedwcześnie urodzonych ze względu na zbyt małą wartość oporu pary wodnej. W warunkach pocącego się manekina ubrania te przepuszczają do otoczenia około 450% więcej pary wodnej niż ubrania modelowe wytworzone z udziałem membrany polipropylenowej i dzianiny w postaci pluszu czarnego. Ta właściwość ubrań komercyjnych sprawia, iż nie chronią one dzieci przedwcześnie urodzonych przed odwodnieniem organizmu. Dodatkowo efektywna wartość izolacyjności cieplnej wyznaczona w warunkach pocącego się manekina jest ponad cztery razy mniejsza niż dla układów o symbolu Plusz czarny/Folia PP/Plusz czarny. Oznacza to, iż stosowanie obecnie wytwarzanych ubrań może prowadzić do hipotermii dzieci przedwcześnie urodzonych z powodu zbyt małej wartości izolacyjności cieplnej. Przedstawione badania wskazują na możliwość weryfikacji właściwości barierowych odzieży funkcjonalnej. Dalsza optymalizacja struktury materiałowej odzieży dla dzieci przedwcześnie urodzonych może opierać się na wykorzystaniu narzędzi umożliwiających symulację transportu strumienia ciepła przez wyroby włókiennicze oraz transportu strumienia ciepła i masy w postaci pary wodnej. Przykłady omawianego podejścia do projektowania odzieży funkcjonalnej zostaną przedstawione w dalszych rozdziałach.

## **2.8. Analiza zjawiska transportu energii cieplnej w dzianinach dwuwarstwowych i laminatach przy użyciu oprogramowania *SolidWorks***

### **2.8.1. Przyjęte warunki symulacji**

Z metodyki przedstawionej w rozdziale 1.9 wynika, iż oprogramowanie dostarczane przez markę *SolidWorks* umożliwia symulację przepływu strumienia ciepła przez dzianiny o zróżnicowanej budowie. Symulacje takie stanowią istotne narzędzie wspierające procesy decyzyjne przy optymalizacji konstrukcji wyrobu. W prowadzonych pracach przeprowadzono symulacje zjawisk transportu energii cieplnej w dzianinach o numerach 1-29 i 38-43, 52-55 i 58-59, których charakterystykę zamieszczono w tabelach 52-53. Symulacje prowadzono w warunkach porównywalnych z warunkami panującymi w komorze klimatyzacyjnej urządzenia Sweating Hotplate 8.2 podczas wyznaczania oporu cieplnego tekstyliów oraz w inkubatorze zgodnie z wytycznymi przedstawionymi w rozdziale 2.7.1 (32°C, 58%). Modele dzianin i układów warstwowych zostały wykonane w programie *SolidWorks 2014* na podstawie zdjęć

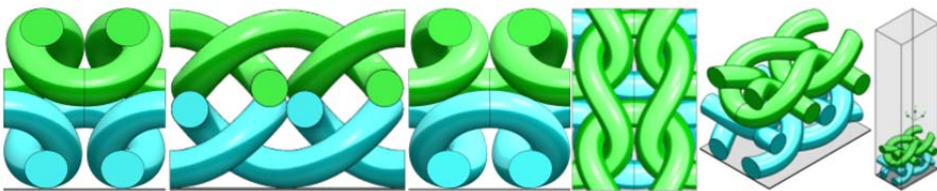
otrzymanych przy użyciu optycznego mikroskopu stereoskopowego. Przykładowe widoki analizowanych dzianin przedstawiono na rysunku 120.



Rys. 120. Model dzianiny dwuwarstwowej wykonany na podstawie zdjęcia spod optycznego mikroskopu stereoskopowego

Źródło: opracowanie własne.

Geometryczny model żyłkowy każdej dzianiny został skonstruowany z warstwy górnej i warstwy dolnej. Model uwzględniał grubość dzianiny (zmierzonej eksperymentalnie) oraz opierał się na średnich parametrach oczka wyznaczonych na podstawie zdjęć mikroskopowych (wysokość i szerokość oczka, średnica przędzy). Początkowo obie warstwy zostały zbudowane z 3 rzędów i 3 kolumnienek. W celu zaoszczędzenia czasu obliczeń model został zredukowany do najmniejszego periodycznego elementu dzianiny – jednego oczka (rysunek 121). W symulacjach górną warstwę zawsze stanowiła nitka sorpcyjna (bawełna, wiskoza pozyskana z biomasy bambusa zwana dla uproszczenia bambusem lub wiskoza klasyczna), natomiast dolną (od strony skóry) – nitka konduktywno-dyfuzywna (polipropylen, poliester, poliamid), a w dzianinach jednoskładnikowych nitka sorpcyjna (bawełna, bambus lub wiskoza).



Rys. 121. Model dzianiny dwuwarstwowej wykonany na podstawie zdjęcia spod optycznego mikroskopu stereoskopowego

Źródło: opracowanie własne.

Symulacje transportu energii przy użyciu programu komputerowego *SolidWorks Flow Simulation* przeprowadzono zgodnie z metodyką opisaną w rozdziale 1.9.3. Dane wejściowe dla przeprowadzonych symulacji zestawiono w tabeli 62. Dla każdej dzianiny model uwzględniał różnice w wartościach następujących parametrów:

- gęstości rządkowej (wyznaczonej na podstawie zdjęcia),
  - gęstości kolumnkowej (jw.),
  - grubości dzianiny (jw.),
  - parametrów fizycznych materiału, z którego została wykonana dzianina, takich jak: gęstości (wartość tablicowa), współczynnika przewodnictwa cieplnego (jw.), ciepła właściwego (jw.), zdolności emisyjnej (jw.).
- We wszystkich symulacjach zostały uwzględnione następujące zjawiska fizyczne: przewodnictwo cieplne, promieniowanie termiczne, konwekcja i grawitacja.

Tabela 63. Wartości parametrów fizycznych surowców użytych do produkcji dzianin

Parametr	Rodzaj surowca						
	Bawełna	PA	Plusz biały	Bambus	Wiskoza	Plusz czarny	PU
Ciepło właściwe, $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	1330	2050	1720	1300	1470	1380	1600
Przewodność cieplna, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	0,072	0,220	0,260	0,042	0,060	0,084	0,025
Względna zdolność emisyjna (c.d.cz. = 1)	0,78	0,69	0,97	0,87	0,80	0,70	0,9

Gotowe modele dzianin i układów warstwowych zostały umieszczone na płycie (wykonanej z miedzi) o stałej temperaturze 35°C. Układ ten został zamknięty w domenie obliczeniowej (rysunek 121) w kształcie prostopadłościanu o wymiarach  $(1,3 \times 1 \times 40 \cdot 10^{-3} m)$ . Warunki początkowe przyjęte podczas symulacji w domenie obliczeniowej odpowiadały warunkom, przy których dokonuje się pomiaru oporu cieplnego przy użyciu urządzenia Sweating Hotplate 8.2 (modelu skóry) i warunkom panującym w inkubatorze. W pierwszym przypadku były one następujące: temperatura powietrza – 20°C, ciśnienie powietrza – 1013,25 hPa, wilgotność względna powietrza – 65%. W drugim przypadku osiągały one wartości: temperatura powietrza – 32°C, ciśnienie powietrza – 1013,25 hPa, wilgotność względna powietrza – 58%. Wszystkie symulacje zostały przeprowadzone dla stanu ustalonego przepływu strumienia ciepła.

## 2.8.2. Wyniki symulacji energii cieplnej przez układy dzianin

W opracowaniu zostały przedstawione wybrane wyniki symulacji przeprowadzonych na trójwymiarowych modelach: pierwszych 29 dzianin dwuwarstwowych, scharakteryzowanych w rozdziale 2.6, w tabeli 52 oraz układów wielowarstwowych, zawierających folie: polipropylenową i poliuretanową, bawełnę cieką i bawełnę grubą oraz plusz czarny i plusz biały, scharakteryzowanych w rozdziale 2.6, w tabeli 53. Głównym celem symulacji było zbadanie różnicy temperatur między dolną a górną warstwą dzianiny/układu warstwowego. Dolna warstwa, będąca w bezpośrednim kontakcie z płytą była z nią zawsze w równowadze termicznej i jej temperatura maksymalna

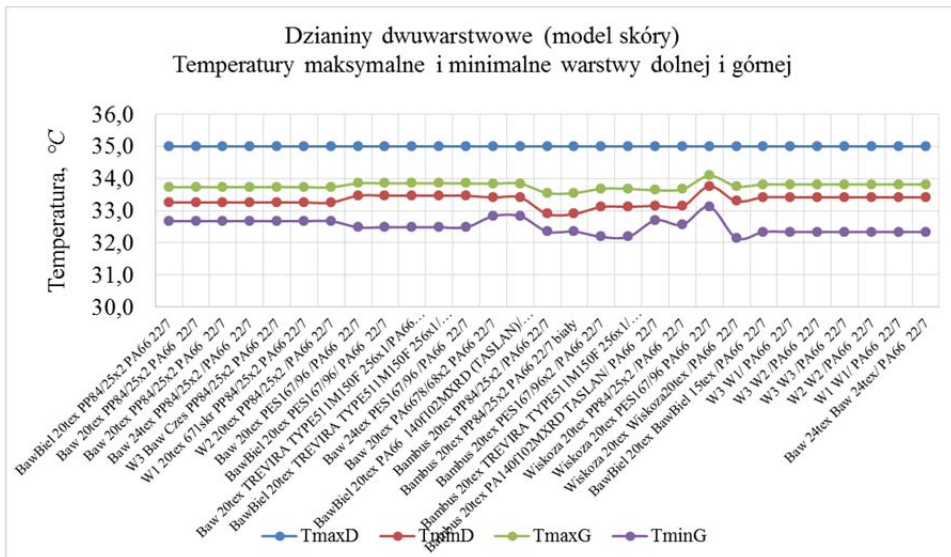
wynosiła 35°C. W symulacjach zostały wyznaczone następujące temperatury dla 29 dzianin dwuwarstwowych:

- temperatura maksymalna dolnej warstwy,  $T_{\max D}$ ,
- temperatura minimalna dolnej warstwy,  $T_{\min D}$ ,
- temperatura maksymalna górnej warstwy,  $T_{\max G}$ ,
- temperatura minimalna górnej warstwy,  $T_{\min G}$ ,

dla układów wielowarstwowych:

- temperatura maksymalna dolnej warstwy,  $T_{\max D}$ ,
- temperatura minimalna górnej warstwy,  $T_{\min G}$ .

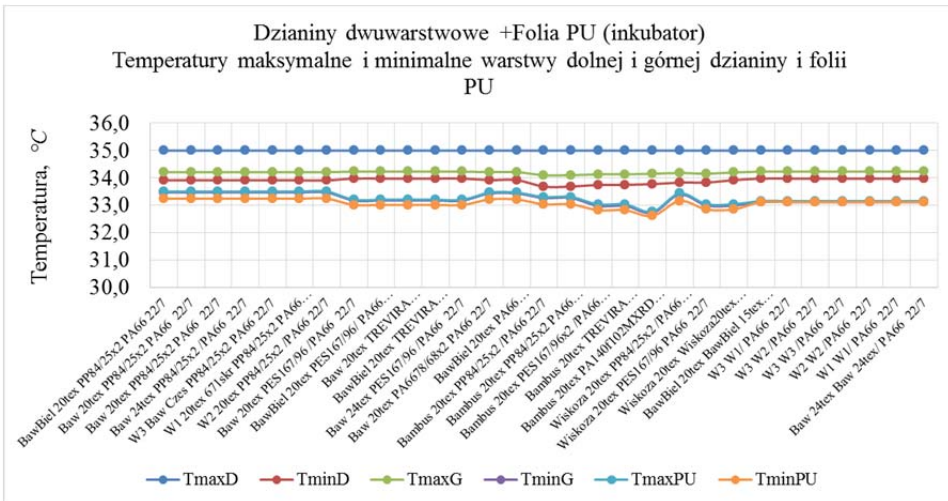
Wyniki zostały przedstawione na rysunkach 122-127 na podstawie obliczonych temperatur  $T_{\max D}$  i  $T_{\min G}$ . Dla każdego materiału została wyznaczona różnica temperatur,  $\Delta T = T_{\max D} - T_{\min G}$  w kierunku prostopadłym do płyty. Wyniki zostały przedstawione w tabelach 64-65 i na rysunku 128.



Rys. 122. Temperatura maksymalna i temperatura minimalna dla górnej i dolnej warstwy dzianiny wyznaczone na podstawie symulacji w warunkach modelu skóry

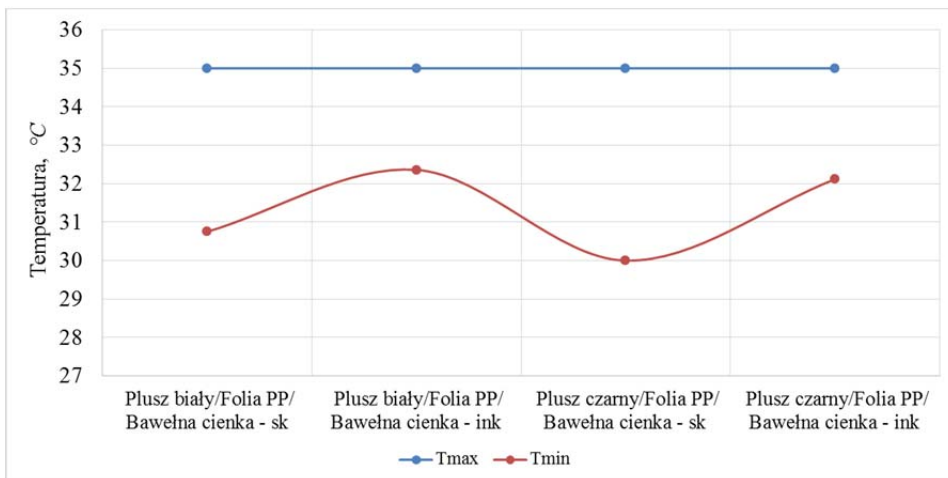
Źródło: opracowanie własne.





Rys. 125. Temperatura maksymalna i temperatura minimalna dla górnej i dolnej warstwy dzianiny oraz folii poliuretanowej wyznaczone na podstawie symulacji w warunkach panujących w inkubatorze

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 126. Temperatury maksymalne i minimalne dla górnych i dolnych warstw dzianin wielowarstwowych wyznaczone na podstawie symulacji w warunkach panujących w modelu skóry-sk i w inkubatorze-ink

Źródło: opracowanie własne.





Tabela 64. Różnica temperatur między dolną i górną warstwą w dzianinach dwuwarstwowych wyznaczona na podstawie symulacji w warunkach panujących w modelu i w inkubatorze

Materiał	$\Delta T, ^\circ C$			
	Model skóry		Inkubator	
	bez folii	folia PP	folia PP	folia PU
Dzianina bawełniano-polipropylenowa – nitka łącząca poliamidowa BawBiel 20 tex PP 84/25x2/PA66 22/7	2,33	2,63	1,79	1,76
Dzianina bawełniano-polipropylenowa – nitka łącząca poliamidowa Baw 20 tex PP 84/25x2/PA66 22/7	2,33	2,63	1,79	1,76
Dzianina bawełniano-polipropylenowa – nitka łącząca poliamidowa Baw 20 tex PP 84/25x2/PA66 22/7	2,33	2,63	1,79	1,76
Dzianina bawełniano-polipropylenowa – nitka łącząca poliamidowa, Baw 24 tex PP 84/25x2 /PA66 22/7	2,33	2,63	1,79	1,76
Dzianina bawełniano-polipropylenowa – nitka łącząca poliamidowa, W3 Baw Czes PP 84/25x2/PA66 22/7	2,33	2,63	1,79	1,76
Dzianina bawełniano-polipropylenowa – nitka łącząca poliamidowa, W1 20 tex 671skr PP 84/25x2/PA66 22/7	2,33	2,63	1,79	1,76
Dzianina bawełniano-polipropylenowa – nitka łącząca poliamidowa, W2 20 tex PP 84/25x2 /PA66 22/7	2,33	2,63	1,79	1,76
Dzianina bawełniano-poliestrowa – nitka łącząca poliamidowa, Baw 20 tex PES 167/96 /PA66 22/7	2,52	2,99	2,04	1,99
Dzianina bawełniano-poliestrowa – nitka łącząca poliamidowa, BawBiel 20 tex PES 167/96/PA66 22/7	2,52	2,99	2,04	1,99
Dzianina bawełniano-poliestrowa – nitka łącząca poliamidowa, Baw 20 tex TREVIRA TYPE511M150F 256x1/PA66 22/7	2,52	2,99	2,04	1,99
Dzianina bawełniano-poliestrowa – nitka łącząca poliamidowa, Baw Biel 20 tex TREVIRA TYPE511M150F 256x1/PA66 22/7	2,52	2,99	2,04	1,99
Dzianina bawełniano-poliestrowa – nitka łącząca poliamidowa, Baw 24 tex PES 167/96 /PA66 22/7	2,52	2,99	2,04	1,99
Dzianina bawełniano-poliamidowa – nitka łącząca poliamidowa, Baw 20 tex PA66 78/68x2, PA66 22/7	2,17	2,67	1,80	1,79
Dzianina bawełniano-poliamidowa – nitka łącząca poliamidowa, Baw Biel 20 tex PA66 140f102MXRD (TASLAN)/PA66 22/7	2,17	2,67	1,80	1,79
Dzianina bambusowo-polipropylenowa – nitka łącząca poliamidowa, Bambus 20 tex PP 84/25x2 /PA66 22/7	2,65	2,93	1,98	1,97
Dzianina bambusowo-polipropylenowa – nitka łącząca poliamidowa, Bambus 20 tex PP 84/25x2/PA66 22/7 biały	2,65	2,93	1,98	1,97
Dzianina bambusowo-poliestrowa – nitka łącząca poliamidowa, Bambus 20 tex PES 167/96x2 /PA66 22/7	2,81	3,27	2,22	2,18
Dzianina bambusowo-poliestrowa – nitka łącząca poliamidowa, Bambus 20 tex TREVIRA TYPE511M150F 256x1/PA66 22/7	2,81	3,27	2,22	2,18
Dzianina bambusowo-poliamidowa – nitka łącząca poliamidowa, Bambus 20 tex PA140f102MXRD TASLAN/PA66 22/7	2,30	2,79	2,04	2,39
Dzianina wiskozowo-polipropylenowa – nitka łącząca poliamidowa Wiskoza 20 tex PP 84/25x2 /PA66 22/7	2,44	2,73	1,85	1,84
Dzianina wiskozowo-poliestrowa – nitka łącząca poliamidowa, Wiskoza 20 tex PES 167/96/ PA66 22/7	1,88	3,13	2,10	2,16
Dzianina wiskozowa dwuwarstwowa – nitka łącząca poliamidowa Wiskoza 20 tex Wiskoza 20 tex /PA66 22/7	2,85	3,23	2,18	2,15
Dzianina bawełniana dwuwarstwowa – nitka łącząca poliamidowa, BawBiel 20 tex BawBiel 15 tex /PA66 22/7	2,66	3,06	2,07	1,88



Dzianina bawełniana dwuwarstwowa – nitka łącząca poliamidowa W3 W1/PA66 22/7	2,66	3,06	2,07	1,88
Dzianina bawełniana dwuwarstwowa – nitka łącząca poliamidowa W3 W2 /PA66 22/7	2,66	3,06	2,07	1,88
Dzianina bawełniana dwuwarstwowa – nitka łącząca poliamidowa W3 W3 /PA66 22/7	2,66	3,06	2,07	1,88
Dzianina bawełniana dwuwarstwowa – nitka łącząca poliamidowa W2 W2 /PA66 22/7	2,66	3,06	2,07	1,88
Dzianina bawełniana dwuwarstwowa – nitka łącząca poliamidowa W1 W1/PA66 22/7	2,66	3,06	2,07	1,88
Dzianina bawełna dwustronna – nitka łącząca poliamidowa, Baw 24 tex Baw 24 tex/PA66 22/7	2,66	3,06	2,07	1,88

Tabela 65. Różnica temperatur  $\Delta T$  między dolną i górną warstwą w układach warstwowych wyznaczona na podstawie symulacji w warunkach panujących w modelu skóry i w inkubatorze

Materiał	$\Delta T$ , °C	
	Model skóry	Inkubator
Folia PP	0,01	0,01
Folia PU	0,17	0,11
Cienka bawełna	1,83	1,37
Gruba bawełna	3,86	2,28
Plusz czarny (PET)	3,88	2,54
Plusz biały (PP)	2,72	1,75
Plusz biały/Folia PP/ Bawełna cienka	4,25	2,64
Plusz czarny/Folia PP/Bawełna cienka	5,00	2,88
Plusz biały/Folia PP/Bawełna gruba	5,51	2,89
Plusz czarny/Folia PP/Bawełna gruba	6,31	3,36
Plusz biały/Folia PP/Plusz biały	3,81	2,26
Plusz czarny/Folia PP/Plusz czarny	4,84	2,76

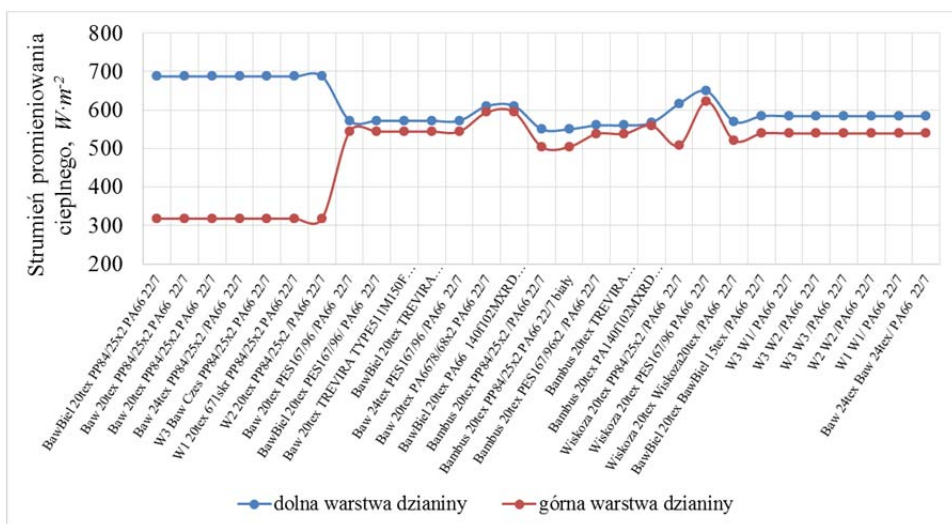
### 2.8.3. Wnioski wynikające z symulacji przepływu strumienia ciepła przez wybrane wyroby włókiennicze przy użyciu oprogramowania *SolidWorks*

Na wartości różnicy temperatur  $\Delta T$  między dolną i górną warstwą zarówno w dzianinach dwuwarstwowych, jak i w układach wielowarstwowych miały wpływ następujące czynniki:

- wymiary materiałów (grubość, porowatość),
- parametry termiczne materiałów (współczynnik przewodnictwa cieplnego, ciepło właściwe),
- temperatura otoczenia (inna dla modelu skóry i inkubatora),
- kolejność ułożenia warstw z różnych surowców.

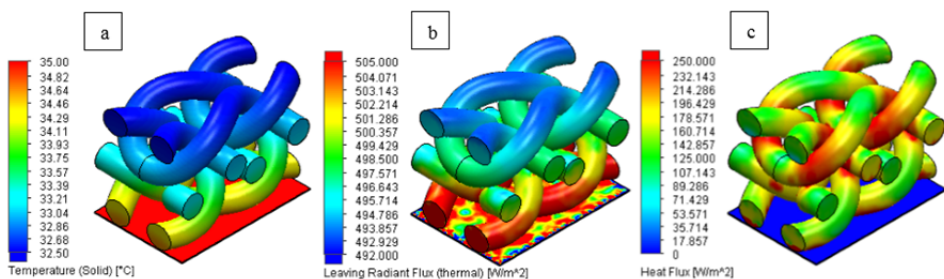
Na podstawie otrzymanych wyników przeprowadzonych symulacji można stwierdzić, iż w warunkach modelu skóry najbardziej termoizolacyjnym materiałem spośród 29 dzianin jest dwuwarstwowa dzianina wiskożowa Wiskoza 20 tex





Rys. 130. Maksymalne wartości strumienia promieniowania ciepłego dla górnej i dolnej warstwy dzianiny wyznaczone na podstawie symulacji w warunkach modelu skóry

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 131. Przykładowe rozkłady: a) temperatury dzianiny, b) strumienia ciepła w dzianinie w wyniku promieniowania termicznego, c) strumienia ciepła w dzianinie w wyniku przewodnictwa ciepłego, otrzymane dla dzianiny o symbolu Wiskoza 20 tex PES 167 dtex/f96/ PA66 22 dtex/f7

Źródło: opracowanie własne.

## **2.9. Opracowanie programu komputerowego do symulacji transportu masy i ciepła przez dyskretne struktury wyrobu włókienniczego służące do ochrony noworodków przedwcześnie urodzonych**

### **2.9.1. Sformułowanie problemu**

Transport ciepła i masy jest wywołany przez różne temperatury i stężenia pary wodnej w konstrukcji materiału warstwowego lub między konstrukcją i otoczeniem. W przedstawionych rozważaniach przedmiotem dyskusji będzie analiza problemu sprężonego, czyli ciepło jest transportowane wraz z wilgocią, podczas gdy transport masy z ciepłem jest pomijalny. Rozważania modelowe dotyczyć będą transportu ciepła i masy przez układy materiałów dwuwarstwowych stosowanych do produkcji czepków dla dzieci przedwcześnie urodzonych.

Model fizyczny jest opisywany za pomocą trzech zmiennych stanu: temperatury  $T$ , stężenia pary wodnej we włóknach  $w_f$  oraz stężenia pary wodnej w przestrzeniach między włóknami  $w_a$ . Model matematyczny wprowadza równania transportu oraz układ warunków brzegowych i początkowych. Kombiniowany sposób transportu ciepła i masy przez sorpcję wilgoci, kondensację i dyfuzję cieczy został przedyskutowany przez Li, Zhu [135] oraz Li, Zhu, Yeung [136]. Model wprowadzony w tych publikacjach jest skomplikowany, jego rozwiązanie przybliżone. Dlatego trudno ustalić jego formę wariacyjną. Dlatego przyjęto sformułowanie transportu sprężonego określone przez Li [59] i Li, Luo [67]. Trzecie równanie zostało przytoczone według Davida i Nordona [66]. Z punktu widzenia fizycznego to model precyzyjny, prosty, możliwy do rozwiązania i włączenia do algorytmów optymalizacji.

Struktura materiału to powtarzalna konstrukcja nitek i wolnych powierzchni między nitkami. Z punktu widzenia homogenizacji nitka to materiał niejednorodny, wytwarzany podczas nitkowania przędz. Dlatego wewnętrzna konstrukcja nitek jest niejednorodna, a wolne przestrzenie mogą być wypełnione powietrzem lub parą wodną. Wewnętrzna porowatość materiału zależy od jego rodzaju, tzn. czy jest to włóknina, dzianina, czy tkanina. Wyroby włókiennicze, w tym czepki noworodka, mają dwa rodzaje porowatości. Jedną z nich to porowatość „zewnątrzna” wynikającą z samej konstrukcji wyrobu, czyli istnienia wolnych przestrzeni między włóknami. Drugą to porowatość „wewnętrzna”, wynikająca z konstrukcji włókien. Generalnie należy przeprowadzać więc podwójną homogenizację dla stworzenia konstrukcji jednorodnej (homogenicznej). Parametry materiałowe, w tym współczynniki przewodności ciepła i transportu masy, są określone przy zastosowaniu podwójnej homogenizacji. Można do tego celu zastosować różne metody matematyczne homogenizacji, z których najbardziej rozpowszechniona to metoda mieszaniny według Golanski, Terada, Kikuchi [60]. Transport masy i ciepła jest określany w jednorodnym materiale.

Założenia modelu są następujące:

- Ciepło jest transportowane przez przewodzenie wewnątrz włókien oraz konwekcję na ich zewnętrznych powierzchniach do wolnych przestrzeni między włóknami. Masa jest transportowana we włóknach i wolnych przestrzeniach między włóknami przez dyfuzję [59].
- Zmiany objętości spowodowane dyfuzją masy można zaniedbać, ponieważ są niewielkie, szczególnie w przypadku tworzywa sztucznego.
- Orientacja włókien może wpływać na transport masy (wilgoci), ponieważ ich średnice są nieduże, a para wodna jest transportowana znacznie szybciej w wolnych przestrzeniach niż w materiale włókien. Należy zawsze uważnie przeanalizować rodzaj materiału i jego skład, z uwagi na różne uporządkowanie i konstrukcję tkanin, dzianin i włóknin.
- Z pewnym przybliżeniem można założyć chwilową równowagę termodynamiczną między materiałem włókien i wolnymi przestrzeniami między włóknami. Tylko takie założenie pozwala na określenie elementarnych bilansów masy i ciepła. Ponadto materiały włókiennicze mają małe wymiary (szczególnie grubość) i mały współczynnik powierzchni do objętości.

Model matematyczny sprzężonego transportu zawiera:

- równania bilansów ciepła i masy,
- równania konstytutywne charakteryzujące materiał z uwagi na transport masy i ciepła,
- równania stanu określające związki między zmiennymi stanu,
- związki fizyko-chemiczne definiujące poszczególne fazy materiału.

Zmienne stanu to temperatura  $T$  oraz stężenia pary wodnej  $w_a$ ,  $w_f$ . Jako pierwszy określa się bilans ciepła przez analizę jego poszczególnych składników. Ciepło może być emitowane przez: wewnętrzne źródło ciepła o wydatku  $f$ , parę wodną przepuszczaną przez materiał, co jest opisywane matematycznie przez porowatość materiału  $\varepsilon$  oraz ciepło sorpcji pary wodnej we włóknach  $\lambda_w$ . Ciepło może być tracone przez: transport do otoczenia, co jest określone matematycznie przez wektor gęstości strumienia ciepła  $\mathbf{q}$  na zewnętrznej powierzchni ograniczającej  $\Gamma$ , akumulację wewnątrz materiału o pojemności cieplnej  $c$ . Z kolei określa się bilans masy, również analizując jego poszczególne składniki. Masa może być emitowana przez wewnętrzne źródło masy o wydatku  $f_w$ . Masa może być tracona poprzez: transport do otoczenia, co można wyrazić wektorem gęstości strumienia masy  $\mathbf{q}_w$  na zewnętrznej powierzchni ograniczającej  $\gamma$ , akumulację we włóknach, akumulację w wolnych przestrzeniach między włóknami.

Zestawiając bilanse masy i ciepła oraz następnie stosując twierdzenie Ostrogradskiego-Gaussa, można określić po przekształceniach równania transportu masy i ciepła w postaci związku (112) [137, 138]. Uzyskany układ równań zawiera trzy zmienne stanu, a tylko dwa równania. Trzecie równanie niezbędne do jego rozwiązania można wprowadzić opisując procesy sorpcji i desorpcji pary wodnej na styku włókien i wolnych przestrzeni między włóknami. Związek ten można wprowadzić w postaci przedstawionej w pracach Davida, Nordona [66], Li [59] i Li, Luo [67].

Sorpcję pary wodnej we włóknach można określić jako proces dwustopniowy. Pierwszy stopień jest opisywany za pomocą prawa Ficka, ze stałym współczynnikiem dyfuzji. Drugi stopień jest opisywany jako zależność doświadczalna, niezwiązana w żaden sposób z prawem Ficka. Dyfuzja jest wówczas nieregularna, włókna podlegają lepkosprężystej relaksacji. Li, Holcombe [68] opisują ten problem dla higroskopowych włókien wełnianych, zgodny z teorią Watta. Zależności matematyczne zostały określone wcześniej i mają postać (113).

Czas równowagi  $t_{eq}$  może być określony eksperymentalnie dla różnych materiałów, patrz np. [66]. Model jest określony przy założeniu chwilowej równowagi termodynamicznej między powierzchnią włókien i wolnymi przestrzeniami między nimi, patrz Li [59]. Pozwala to zapisać zmienną stanu  $w_f$  podczas pierwszej fazy procesu sorpcji w poniższej postaci:

$$w_f(\mathbf{x}, R_f, t) = \rho W_C(H_f) \quad (164)$$

W powyższej zależności, poza wcześniej wyjaśnionymi symbolami,  $W_C$  oznacza zawartość frakcji pary wodnej na powierzchni włókna, wielkość bezwymiarową,  $\mathbf{x}$  to wektor współrzędnych podstawowych punktów geometrycznych wyrażony w  $m$ . Zawartość frakcji pary wodnej na powierzchni włókna  $W_C$  może być określona za pomocą krzywych izoterm wewnątrz materiału włókien. Zakładając kształt walcowy włókien, wydatek sorpcji podczas pierwszej fazy procesu  $R_1$  jest określony za pomocą równania różniczkowego wyrażonego przez Cranka [70]. Uwzględniając związek (164) i przyjmując opis procesu sorpcji wilgoci wyłącznie do suchego włókna, zależność określającą wydatek sorpcji  $R_1$  można zapisać ponownie związkiem (114). Dla dalszego opisu należy przeanalizować zjawiska fizyczne zachodzące na powierzchni styku włókien i wolnych powierzchni między nimi. Sorpcję i desorpcję pary wodnej na tej powierzchni można określić za pomocą współczynnika  $\beta$ , patrz Crank [70], Li [59]. Zapis matematyczny jest postaci (115). Pozwala to zapisać równania transportu masy i ciepła podczas pierwszej fazy procesu sorpcji w postaci równań różniczkowych (116). Wydatek procesu sorpcji podczas drugiej fazy procesu  $R_2$  można określić doświadczalnie według Li [59]. Jest to funkcja wilgotności całkowitych  $H_1, H_2$  i ma postać równania (117). Powyższe równanie ma skomplikowaną postać, kłopotliwą dla prostego i dokładnego rozwiązania. Można je określić tylko dla określonych wartości funkcji  $H_a, H_f$ . Tak więc rozwiązanie wymaga ponownie analizy zjawisk na styku powierzchnia włókien/wolne przestrzenie między włóknami. Rozważmy definicje wilgotności całkowitej i względnej oraz podstawowe prawo gazów doskonałych [135]. Chwilowa równowaga termodynamiczna wymusza takie same parametry na styku włókna/wolne powierzchnie, czyli  $E_a = E_f, T_a = T_f$ , co można zapisać w postaci:

$$\frac{H_f}{H_a} = \frac{R_v^{-1} \frac{e_f}{T_f}}{R_v^{-1} \frac{e_a}{T_a}} = \frac{e_f}{e_a} = \eta; \quad \frac{w_f}{w_a} = \frac{\frac{e_f}{E_f} \cdot 100\%}{\frac{e_a}{E_a} \cdot 100\%} = \frac{e_f}{e_a} = \eta \quad (165)$$

W powyższej zależności nowy symbol  $R_v$  to uniwersalna stała gazowa dla pary wodnej, tj. w odniesieniu do masy molowej,  $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ . Jak wynika z powyższych zależności, proporcje wilgotności całkowitych i względnych są takie same, równe współczynnikowi proporcjonalności  $\eta$ . Pozwala to również określić proporcje zapisane matematycznie związkami (118). Analizując stronę fizyczną, jest to współczynnik absorpcji/desorpcji pary wodnej na styku włókna/wolne przestrzenie między włóknami. Tak więc równania transportu podczas drugiej fazy procesu sorpcji mają postać (119). Porównując zależności (116) i (119) można zauważyć, że są one zbliżone matematycznie. Pozwala to na syntetyczny zapis równań transportu w pierwszej i drugiej fazie procesu sorpcji w postaci związków (120). Rozwiązanie układu równań różniczkowych wymaga wprowadzenia układu warunków brzegowych i początkowych (137). Warunki pierwszego rodzaju określają wartości zmiennych stanu  $T$  oraz  $w_f$  na częściach brzegu zewnętrznego  $\Gamma_T$  i  $\Gamma_l$ . Warunki drugiego rodzaju wprowadzają określone gęstości strumienia ciepła w kierunku normalnym do fragmentów brzegu zewnętrznego  $\Gamma_q$ ;  $\Gamma_2$ . Warunki trzeciego rodzaju określają gęstości konwekcyjnego strumienia ciepła normalne do części brzegu zewnętrznego  $\Gamma_C$ ;  $\Gamma_3$ . Warunki brzegowe czwartego rodzaju definiują takie same wartości zmiennych stanu na wspólnych częściach brzegu wewnętrznego (np. w konstrukcji kompozytowej). Warunki początkowe wprowadzają zmienne stanu na początku procesu sprzężonego transportu masy i ciepła. Zależności te można określić w zbiorczej postaci, posługując się ponownie równaniami (121)-(126).

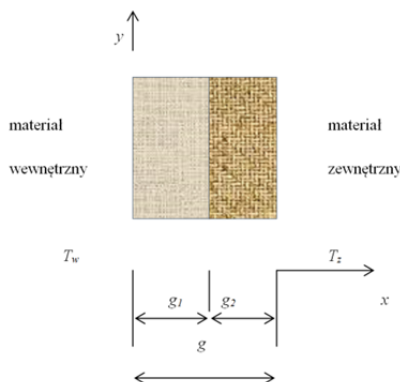
## 2.9.2. Adaptacja problemu do warunków czepka noworodka

Przyjęcie problemu czepka noworodka wymaga uwzględnienia szeregu założeń. Wynikają one zarówno z rzeczywistej konstrukcji takiego wyrobu włókienniczego, jak i z pewnych uproszczeń, przedstawionych poniżej.

- Z uwagi na niemożliwość określenia dokładnych danych procesu niustalowanego dla czepka oraz ich małą powtarzalność dla organizmu noworodka, w założonej adaptacji przyjęto ustalone przewodzenie ciepła, tj. niezależne od czasu. Ponadto stan ustalony jest osiąganym szybko, z uwagi na nieznaczną grubość materiału, znacznie poniżej czasu zakończenia pierwszego etapu sorpcji i czasu równowagi. Oznacza to, że przyrosty zmiennych stanu w czasie, czyli pochodne czasowe zmiennych stanu są równe zero. Lewe strony obu zależności układu równań (120) są zatem równe zero.
- Czepki noworodków nie mają wewnętrznych źródeł ciepła i masy  $f = f_w = 0$ .

- Wstępne gęstości strumieni ciepła i masy w materiale czepek są równe zero  $\mathbf{q}^* = \mathbf{q}_w^* = 0$ .
- Macierz współczynników przewodności cieplnej i macierz współczynników transportu masy są niezależne od zmiennych projektowania, ponieważ w innym przypadku nie jest możliwe efektywne przeprowadzenie całkowania.
- Z uwagi na jednokierunkowe przewodzenie ciepła macierz współczynników przewodności cieplnej jest jednoskładnikowa  $\mathbf{A} = |\lambda|$ , gdzie  $\lambda$  to współczynnik przewodności cieplnej przy jednokierunkowym przewodzeniu ciepła,  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ .

Powyższe założenia dają znaczne uproszczenia zależności opisujących wektory gęstości strumienia ciepła i masy. Dlatego układ równań transportu ciepła i masy (120) upraszcza się do postaci (129). Wynika stąd, że dla przyjętego modelu w stanie ustalonym przewodzenia ciepła i masy występuje brak sprzężenia tych zjawisk. Powyższe równania można więc rozwiązywać osobno. W przyjętym rozwiązaniu zakłada się istnienie dwóch warstw materiału, z którego wytworzono czepek. Nie są jednak znane rozkłady grubości tych materiałów, zostały założone hipotetycznie.



Rys. 132. Przykładowo założona warstwowa budowa czepek noworodka:  $g$  – całkowita grubość materiału,  $g_1, g_2$  – cząstkowe grubości materiałów,  $T_w, T_z$  – temperatury strony wewnętrznej i zewnętrznej czepek

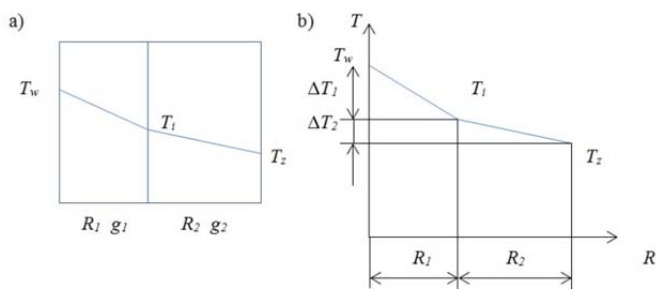
Źródło: opracowanie własne.

W przypadku przedstawionym na rysunku 132 problem jest jednowymiarowy, ponieważ transport masy i ciepła odbywa się wyłącznie w kierunku osi  $x$ , od ciała noworodka do otoczenia. Pozwala to zapisać zależność (129) w znacznie prostszej postaci:

$$\begin{cases} Dw_{f,xx} = 0; \\ \lambda T_{,xx} = 0. \end{cases} \quad (166)$$



Zadanie to jest powszechnie określane jako przenikanie ciepła przez przegrodę płaską, jedno- lub wielowarstwową, patrz Kostowski [139]. Zawsze jest ono rozwiązywane przy założeniu warunków brzegowych pierwszego rodzaju, czyli temperatury określonej na powierzchni głowy noworodka (np. za pomocą klasycznego termometru) oraz na powierzchni czepka (np. za pomocą kamery termowizyjnej). Pozwala to określić rozkład temperatur jako liniowy i spadki temperatur jako zależne od oporów ciepła (rysunek 133). W dalszej części będzie rozwiązany problem przewodzenia ciepła. Analogicznie rozwiązuje się to zadanie dla dyfuzji masy (wilgoci/pary wodnej).



Rys. 133. a) Rozkład temperatury przy przewodzeniu ciepła w przegrodzie dwuwarstwowej, b) Reguła spadków temperatur

Źródło: opracowanie własne.

W przypadku materiału dwuwarstwowego zakłada się idealny kontakt w miejscu styku warstw materiału, co gwarantuje równość zmiennej stanu (temperatury) na tej powierzchni. Fizycznie są to warunki brzegowe czwartego rodzaju. Załóżmy również, że ciepło jest przekazywane od strony wewnętrznej na zewnątrz materiału. Spadek temperatury w pierwszej, wewnętrznej warstwie materiału ma postać:

$$\frac{T_w - T_i}{T_w - T_z} = \frac{R_{T1}}{R_{T1} + R_{T2}}. \quad (167)$$

Odpowiednio dla drugiej warstwy (zewewnętrznej) można zapisać:

$$\frac{T_i - T_z}{T_w - T_z} = \frac{R_{T2}}{R_{T1} + R_{T2}}. \quad (168)$$

W związkach (168)  $T_w$  oznacza temperaturę powierzchni wewnętrznej w  $^{\circ}\text{C}$ ,  $T_z$  to temperatura powierzchni zewnętrznej w  $^{\circ}\text{C}$ ,  $T_i$  – temperatura brzegu wewnętrznego (interfejsu) w  $^{\circ}\text{C}$ ,  $R_T$  – opór cieplny wyrażony w  $\text{m}\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$ , z indeksem 1 dotyczy warstwy wewnętrznej, indeksem 2 warstwy zewnętrznej. W sposób zupełnie analogiczny można przeprowadzić analizę zjawiska transportu pary wodnej (wilgoci), wprowadzając opory przewodzenia pary wodnej. Spadki stężenia pary wodnej w obu warstwach są następujące:

$$\frac{w_{f_w} - w_{f_i}}{w_{f_w} - w_{f_z}} = \frac{R_{w1}}{R_{w1} + R_{w2}}; \quad \frac{w_{f_i} - w_{f_z}}{w_{f_w} - w_{f_z}} = \frac{R_{w2}}{R_{w1} + R_{w2}}. \quad (169)$$

W równaniach (169):  $w_{f_w}$  – stężenie pary wodnej we włóknach na powierzchni wewnętrznej wyrażone w  $kg \cdot m^{-3}$ ,  $w_{f_z}$  – stężenie pary wodnej we włóknach na powierzchni zewnętrznej w  $kg \cdot m^{-3}$ ,  $w_{f_w}$  – stężenie pary wodnej we włóknach na powierzchni brzegu wewnętrznego w  $kg \cdot m^{-3}$ ,  $R_w$  – opór pary wyrażony w  $m^2 \cdot Pa \cdot W^{-1}$ , z indeksem 1 dotyczy warstwy wewnętrznej, indeksem 2 – warstwy zewnętrznej. Dla wykonania symulacji rozkładu temperatury i stężenia pary wodnej należy przyjąć pewne założenia.

- Zaproponowany model musi uwzględniać dwa rodzaje materiału, ponieważ pomiary zostały przedstawione dla dwóch stron materiału. Z uwagi na dwa rodzaje/dwie strony materiału zostały przyjęte dwie jego warstwy. Przyjęto hipotetycznie, że podział na warstwy następuje w połowie długości, tj. każdy z materiałów ma taką samą grubość.
- Temperatura na brzegu wewnętrznym czepka to temperatura warstwy powietrza między materiałem a skórą głowy. Została ona przyjęta jako stała i równa  $T_w = 34^\circ C$ .
- Stężenie pary wodnej na brzegu wewnętrznym czepka to wilgotność bezwzględna warstwy powietrza między materiałem a skórą głowy. Została ona przyjęta jako stała i równa  $w_{f_w} = 0,08 kg \cdot m^{-3}$ .
- Temperatura na brzegu zewnętrznym czepka zależy od szeregu czynników. Ponieważ nie zostały przeprowadzone żadne pomiary, założono trzy podstawowe wartości:  $T_{z1} = 27^\circ C$ ;  $T_{z1} = 29^\circ C$ ;  $T_{z1} = 31^\circ C$ .
- Stężenie pary wodnej na brzegu zewnętrznym czepka zależy od szeregu czynników. Ponieważ nie zostały przeprowadzone żadne pomiary, założono trzy podstawowe wartości:  $w_{fz1} = 0,04 kg \cdot m^{-3}$ ;  $w_{fz2} = 0,05 kg \cdot m^{-3}$ ;  $w_{fz3} = 0,06 kg \cdot m^{-3}$ .
- Dla jednej wartości  $T_w$  i każdej z powyższych wartości temperatury  $T_z$  zostały wyznaczone trzy wartości temperatur pośrednich  $T_{i1}$ ,  $T_{i2}$ ,  $T_{i3}$  na styku warstw, tj. w połowie grubości materiału.
- Podobnie jak dla temperatur, dla jednej wartości  $w_{f_w}$  i każdej z powyższych wartości temperatury  $w_{f_z}$  zostały wyznaczone trzy wartości temperatur pośrednich  $w_{fi1}$ ,  $w_{fi2}$ ,  $w_{fi3}$  na styku warstw, tj. w połowie grubości materiału.

### 2.9.3. Wyniki symulacji numerycznych

Symulacje numeryczne zostały przeprowadzone dla pierwszych 29 kombinacji materiałów przedstawionych w tabeli 52. Wyniki obliczeń zostały zestawione w postaci tabel i odpowiednich wykresów zmienności temperatury oraz stężenia pary wodnej. Każda z tabel zawiera w poszczególnych kolumnach następujące dane:

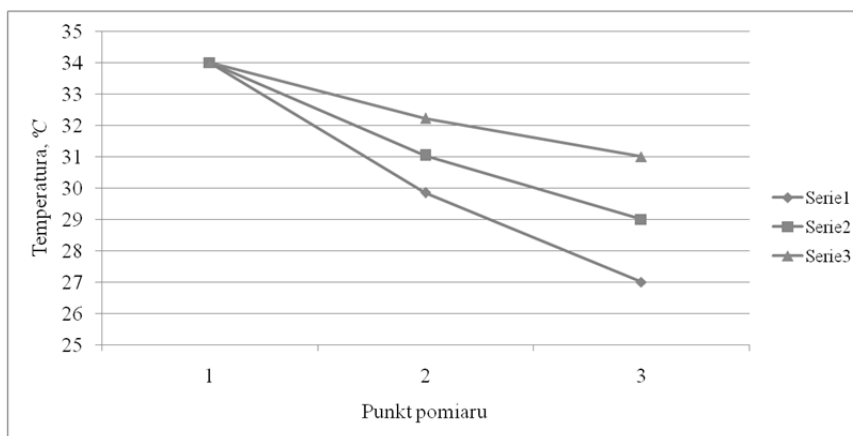
- Numer serii na załączonym dalej wykresie.

- Założoną temperaturę w punkcie na wewnętrznej powierzchni materiału  $T_w = 34^\circ\text{C}$  lub założoną wartość stężenia pary wodnej w tym punkcie  $w_{f,w} = 0,08 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Jest to zawsze stała wartość, niezależnie od kombinacji materiałów. Punkt ten ma zawsze na wykresie numer 1 i współrzędną równą zero.
- Obliczoną wartość trzech różnych temperatur lub trzech różnych stężeń pary wodnej w punkcie pośrednim. Punkt ten ma zawsze na wykresie numer 7, a jego współrzędna zależy od grubości całkowitej materiału i jest zawsze jej połową. Jej wartość jest podana w nagłówku tabeli.
- Założoną temperaturę na brzegu zewnętrznym czepka, tj. trzy podstawowe wartości:  $T_{z1} = 27^\circ\text{C}$ ;  $T_{z1} = 29^\circ\text{C}$ ;  $T_{z1} = 31^\circ\text{C}$ , stałe dla wszystkich przypadków lub odpowiednio trzy podstawowe wartości stężeń pary wodnej:  $w_{fz1} = 0,04 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $w_{fz2} = 0,05 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $w_{fz3} = 0,06 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Punkt na brzegu zewnętrznym ma współrzędną wynikającą z podanej grubości materiału. Jest ona podana w nagłówku tabeli.

Każdemu z materiałów i obliczeniom w postaci tabel towarzyszy wizualizacja w postaci wykresu zmienności temperatur w funkcji grubości materiału. Przebiegi temperatur i stężenia pary wodnej (wilgoci) zostały wyznaczone z wykorzystaniem tych samych założeń, a ich zmienności są analogiczne – liniowe.

Tabela 66. Rozkład temperatur dla materiału 1 (dzianina bawełniano-polipropylenowa – nitka łącząca poliamidowa BawBiel 20 tex PP 84/25x2/ PA66 22/7)

Numer serii	Temperatura materiału w poszczególnych warstwach, °C		
	Nr 1 = 0	Nr 2 = 0,708	Nr 3 = 1,416
1	34,00	29,85	27,00
2	34,00	31,04	29,00
3	34,00	32,22	31,00

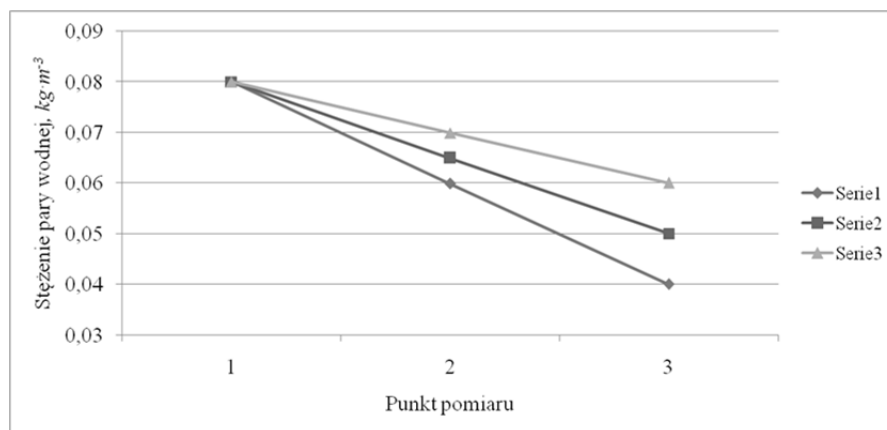


Rys. 134. Rozkład temperatur dla materiału 1 (dzianina bawełniano-polipropylenowa – nitka łącząca poliamidowa BawBiel 20 tex PP 84/25x2/ PA66 22/7)

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 67. Rozkład stężeń pary wodnej dla materiału 1 (dzianina bawełniano-polipropylenowa – nitka łącząca poliamidowa BawBiel 20 tex PP 84/25x2/ PA66 22/7)

Numer serii	Stężenie pary wodnej w poszczególnych warstwach, $kg \cdot m^{-3}$		
	Nr 1 = 0	Nr 2 = 0,708	Nr 3 = 1,416
1	0,0800	0,0599	0,0400
2	0,0800	0,0649	0,0500
3	0,0800	0,0699	0,0600



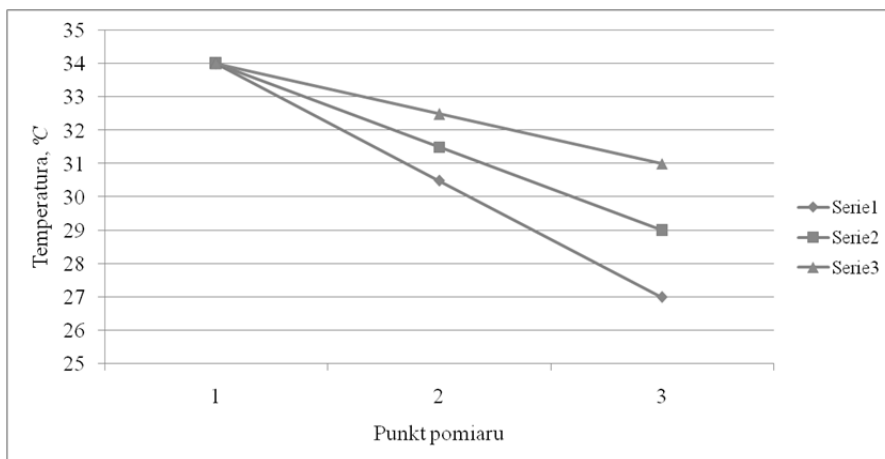
Rys. 135. Rozkład stężeń pary wodnej dla materiału 1 (dzianina bawełniano-polipropylenowa – nitka łącząca poliamidowa BawBiel 20 tex PP 84/25x2/PA66 22/7)

Źródło: opracowanie własne.

Uzyskane rozkłady temperatur i stężeń pary wodnej mają różne charaktery przebiegu. Opory cieplne są różne w obu warstwach materiału o takich samych grubościach, dlatego temperatura także zmienia się w sposób różny w obu warstwach. Różnice są stosunkowo nieduże, ale większe spadki temperatury występują w warstwie bliższej ciału noworodka. Opory przepływu pary wodnej są zbliżone w obu warstwach, stąd przebiegi stężeń pary wodnej są takie same w obu częściach materiału.

Tabela 68. Rozkład temperatur dla materiału 2 (dzianina bawełniano-polipropylenowa – nitka łącząca poliamidowa Baw 20 tex PP 84/25x2/PA66 22/7)

Numer serii	Temperatura materiału w poszczególnych warstwach, $^{\circ}C$		
	Nr 1 = 0	Nr 2 = 0,7005	Nr 3 = 1,401
1	34,00	30,49	27,00
2	34,00	31,50	29,00
3	34,00	32,49	31,00

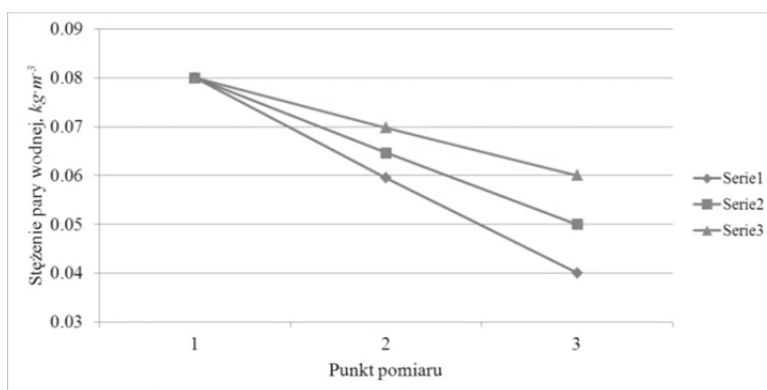


Rys. 136. Rozkład temperatur dla materiału 2 (dzianina bawełniano-polipropylenowa – nitka łącząca poliamidowa Baw 20 tex PP 84/25x2/PA66 22/7)

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 69. Rozkład stężeń pary wodnej dla materiału 2 (dzianina bawełniano-polipropylenowa – nitka łącząca poliamidowa Baw 20 tex PP 84/25x2/PA66 22/7)

Numer serii	Stężenie pary wodnej w poszczególnych warstwach, $kg \cdot m^{-3}$		
	Nr 1 = 0	Nr 2 = 0,7005	Nr 3 = 1,401
1	0,0800	0,0595	0,0400
2	0,0800	0,0646	0,0500
3	0,0800	0,0698	0,0600



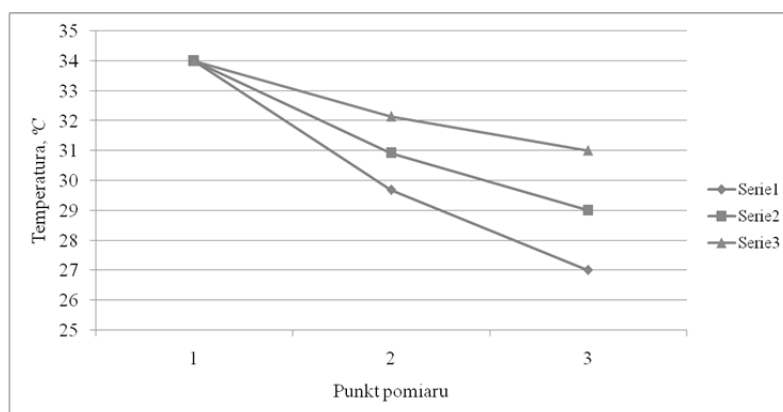
Rys. 137. Rozkład stężeń pary wodnej dla materiału 2 (dzianina bawełniano-polipropylenowa – nitka łącząca poliamidowa Baw 20 tex PP 84/25x2/PA66 22/7)

Źródło: opracowanie własne.

Uzyskane opory cieplne są zbliżone co do wartości w obu warstwach, opory pary wodnej są również zbliżone wartościami w każdej z warstw. Dlatego odpowiednie zmienności temperatur są takie same w obu warstwach, to samo dotyczy stężeń pary wodnej, co graficznie jest wyrażone liniami prostymi we wszystkich przypadkach.

Tabela 70. Rozkład temperatur dla materiału 3 (dzianina bawełniano-polipropylenowa – nitka łącząca poliamidowa Baw 20 tex PP 84/25x2/PA66 22/7)

Numer serii	Temperatura materiału w poszczególnych warstwach, °C		
	Nr 1 = 0	Nr 2 = 0,7375	Nr 3 = 1,475
1	34,00	29,69	27,00
2	34,00	30,92	29,00
3	34,00	32,15	31,00

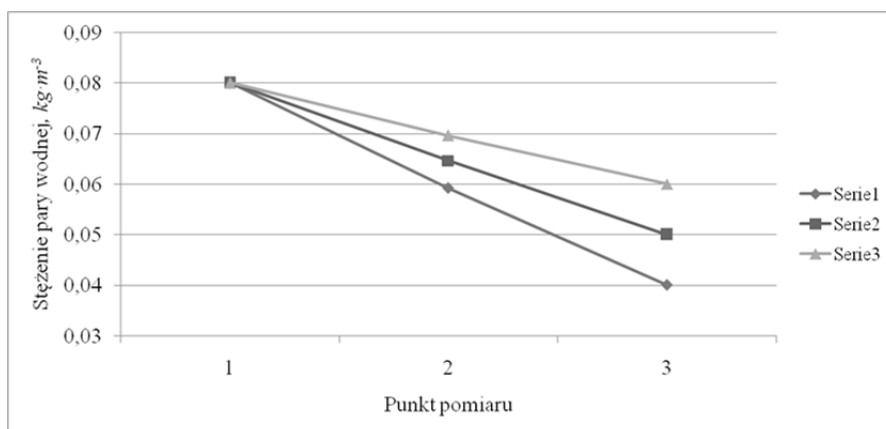


Rys. 138. Rozkład temperatur dla materiału 3 (dzianina bawełniano-polipropylenowa – nitka łącząca poliamidowa Baw 20 tex PP 84/25x2/PA66 22/7)

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 71. Rozkład stężeń pary wodnej dla materiału 3 (dzianina bawełniano-polipropylenowa – nitka łącząca poliamidowa Baw 20 tex PP 84/25x2/PA66 22/7)

Numer serii	Stężenie pary wodnej w poszczególnych warstwach, $kg \cdot m^{-3}$		
	Nr 1 = 0	Nr 2 = 0,7375	Nr 3 = 1,475
1	0,0800	0,0592	0,0400
2	0,0800	0,0646	0,0500
3	0,0800	0,0696	0,0600



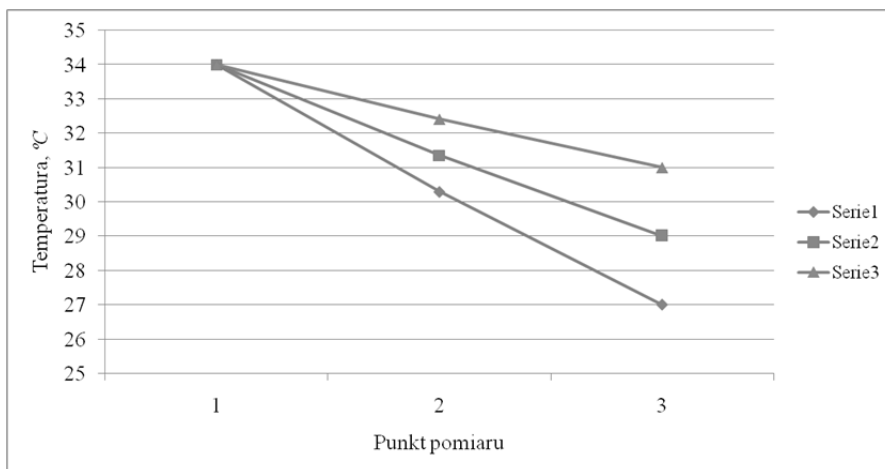
Rys. 139. Rozkład stężeń pary wodnej dla materiału 3 (dzianina bawełniano-polipropylenowa –nitka łącząca poliamidowa Baw 20 tex PP 84/25x2/PA66 22/7)

Źródło: opracowanie własne.

Uzyskane zmienności temperatur są różne w obu warstwach, co jest konsekwencją różnych oporów cieplnych materiałów. Większa wartość oporu cieplnego występuje w wewnętrznej warstwie materiału. Zmienność stężeń pary wodnej jest prawie taka sama w obu warstwach, ponieważ opory pary wodnej są porównywalne w obu materiałach.

Tabela 72. Rozkład temperatur dla materiału 4 (dzianina bawełniano-polipropylenowa – nitka łącząca poliamidowa Baw 24 tex PP 84/25x2 /PA66 22/7)

Numer serii	Temperatura materiału w poszczególnych warstwach, °C		
	Nr 1 = 0	Nr 2 = 0,7155	Nr 3 = 1,431
1	34,00	30,29	27,00
2	34,00	31,35	29,00
3	34,00	32,41	31,00

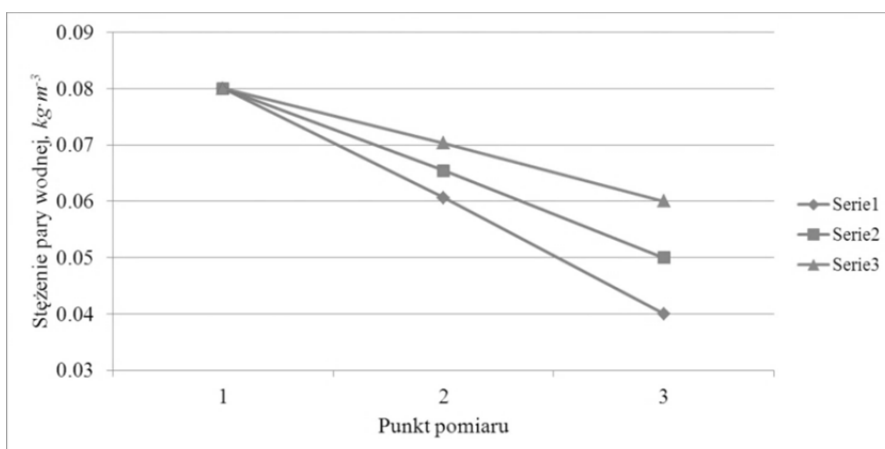


Rys. 140. Rozkład temperatur dla materiału 4 (dzianina bawełniano-polipropylenowa – nitka łącząca poliamidowa Baw 24 tex PP 84/25x2 /PA66 22/7)

Źródło: opracowanie własne

Tabela 73. Rozkład stężeń pary wodnej dla materiału 4 (dzianina bawełniano-polipropylenowa – nitka łącząca poliamidowa Baw 24 tex PP 84/25x2 /PA66 22/7)

Numer serii	Stężenie pary wodnej w poszczególnych warstwach, $kg \cdot m^{-3}$		
	Nr 1 = 0	Nr 2 = 0,7155	Nr 3 = 1,431
1	0,0800	0,0606	0,0400
2	0,0800	0,0654	0,0500
3	0,0800	0,0703	0,0600



Rys. 141. Rozkład stężeń pary wodnej dla materiału 4 (dzianina bawełniano-polipropylenowa – nitka łącząca poliamidowa Baw24tex PP84/25x2 /PA 66 22/7)

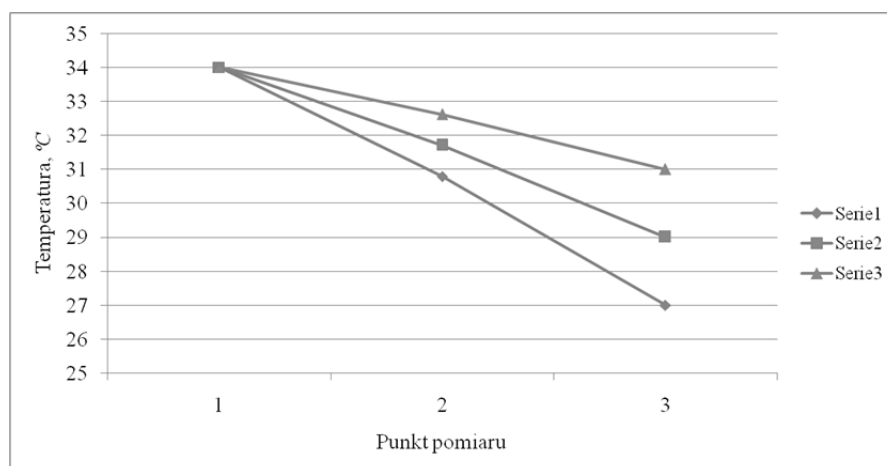
Źródło: opracowanie własne.



Podobnie jak dla materiału 2 zmienności temperatur są podobne niezależnie od serii badań, rozkład oporów ciepła jest zbliżony dla obu warstw. Rozkłady stężeń pary wodnej są również zbliżone, ponieważ porównywalne są opory przepływu wilgoci. Rozpatrując graficzny zapis przewodzenia ciepła i pary wodnej, kąty pochylenia do poziomu są zbliżone dla odpowiednich wykresów.

Tabela 74. Rozkład temperatur dla materiału 5 (dzianina bawełniano-polipropylenowa – nitka łącząca poliamidowa W3 Baw Czes PP 84/25x2 PA66 22/7)

Numer serii	Temperatura materiału w poszczególnych warstwach, °C		
	Nr 1 = 0	Nr 2 = 0,664	Nr 3 = 1,328
1	34,00	30,79	27,00
2	34,00	31,71	29,00
3	34,00	32,62	31,00

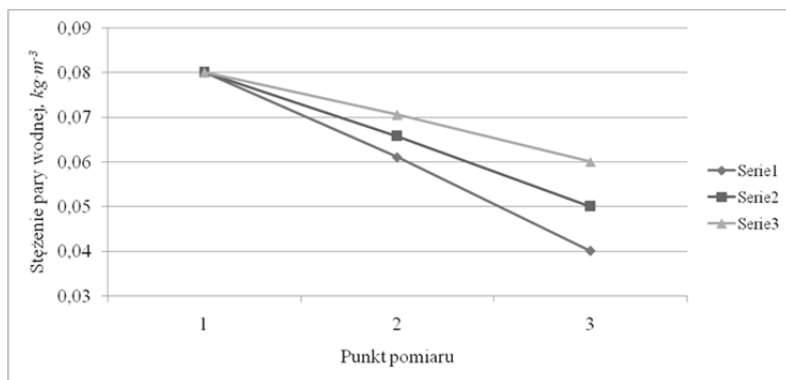


Rys. 142. Rozkład temperatur dla materiału 5 (dzianina bawełniano-polipropylenowa – nitka łącząca poliamidowa W3 Baw Czes PP 84/25x2/PA66 22/7)

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 75. Rozkład stężeń pary wodnej dla materiału 5 (dzianina bawełniano-polipropylenowa – nitka łącząca poliamidowa W3 Baw Czes PP 84/25x2/PA66 22/7)

Numer serii	Stężenie pary wodnej w poszczególnych warstwach, $kg \cdot m^{-3}$		
	Nr 1 = 0	Nr 2 = 0,7155	Nr 3 = 1,431
1	0,0800	0,0610	0,0400
2	0,0800	0,0657	0,0500
3	0,0800	0,0705	0,0600



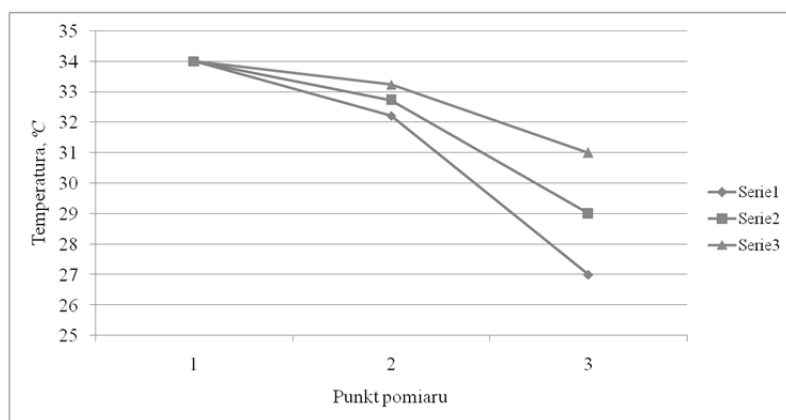
Rys. 143. Rozkład stężeń pary wodnej dla materiału 5 (dzianina bawełniano-polipropylenowa – nitka łącząca poliamidowa W3 Baw Czes PP 84/25x2/PA66 22/7)

Źródło: opracowanie własne.

Zmienności temperatur są zbliżone, ponieważ rozkład oporów ciepła jest podobny dla obu warstw materiału. Analogiczna sytuacja dotyczy stężeń pary wodnej, z uwagi na zbliżone opory przepływu pary. Graficznie jest to opisane przez kąty pochylenia do poziomu zbliżone dla wykresów temperatur, podobnie jest dla stężeń pary wodnej.

Tabela 76. Rozkład temperatur dla materiału 6 (dzianina bawełniano-polipropylenowa – nitka łącząca poliamidowa W1 20 tex 671skr PP 84/25x2/PA66 22/7)

Numer serii	Temperatura materiału w poszczególnych warstwach, °C		
	Nr 1 = 0	Nr 2 = 0,7545	Nr 3 = 1,509
1	34,00	32,21	27,00
2	34,00	32,72	29,00
3	34,00	33,23	31,00

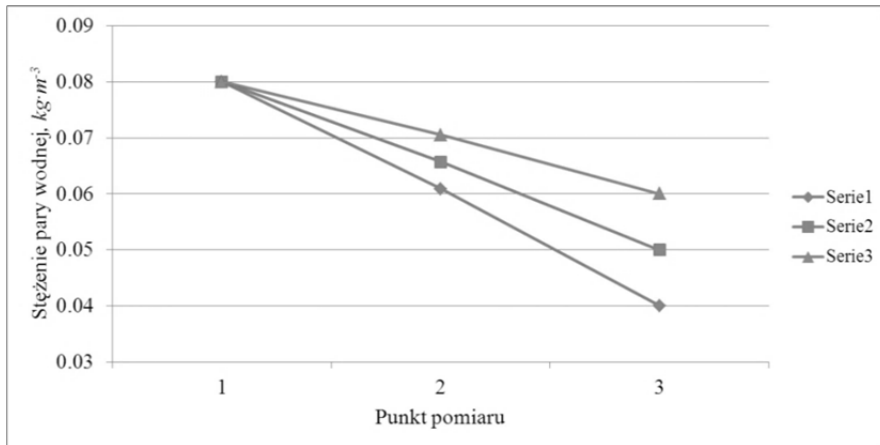


Rys. 144. Rozkład temperatur dla materiału 6 (dzianina bawełniano-polipropylenowa – nitka łącząca poliamidowa W1 20 tex 671skr PP 84/25x2/PA66 22/7)

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 77. Rozkład stężeń pary wodnej dla materiału 6 (dzianina bawełniano-polipropylenowa – nitka łącząca poliamidowa W1 20 tex 671 skr PP 84/25x2/PA66 22/7)

Numer serii	Stężenie pary wodnej w poszczególnych warstwach, $kg \cdot m^{-3}$		
	Nr 1 = 0	Nr 2 = 0,7545	Nr 3 = 1,509
1	0,0800	0,0609	0,0400
2	0,0800	0,0657	0,0500
3	0,0800	0,0705	0,0600



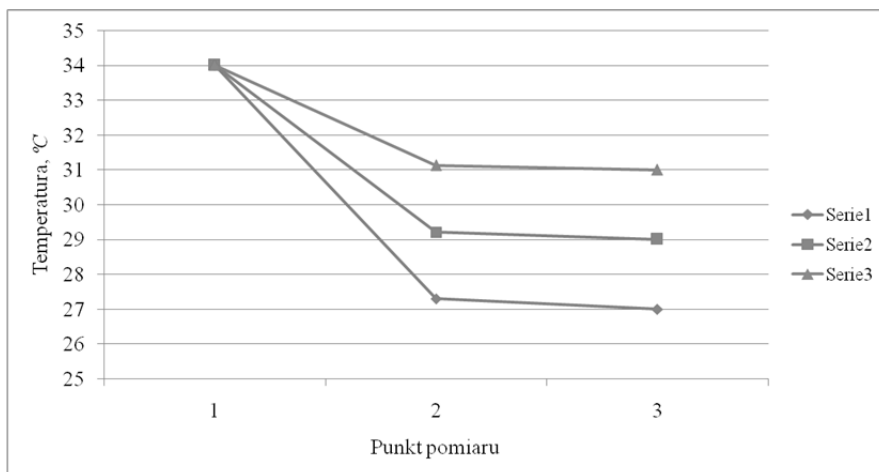
Rys. 145. Rozkład stężeń pary wodnej dla materiału 6 (dzianina bawełniano-polipropylenowa – nitka łącząca poliamidowa W1 20 tex 671 skr PP 84/25x2/PA66 22/7)

Źródło: opracowanie własne.

Opory ciepła są zdecydowanie różne dla obu warstw, różnica jest bardzo znaczna, dlatego kąty pochylenia wykresu na obu odcinkach są różne. Większy opór występuje w warstwie zewnętrznej. Opory pary wodnej są podobne w obu warstwach, dlatego uzyskane kąty pochylenia są podobne.

Tabela 78. Rozkład temperatur dla materiału 7 (dzianina bawełniano-polipropylenowa – nitka łącząca poliamidowa W2 20 tex PP 84/25x2 /PA66 22/7)

Numer serii	Temperatura materiału w poszczególnych warstwach, $^{\circ}C$		
	Nr 1 = 0	Nr 2 = 0,7325	Nr 3 = 1,465
1	34,00	27,30	27,00
2	34,00	29,21	29,00
3	34,00	31,13	31,00

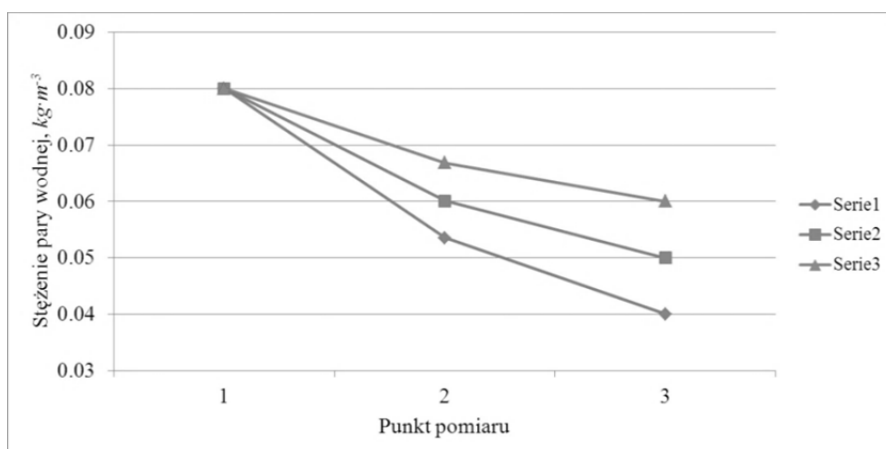


Rys. 146. Rozkład temperatur dla materiału 7 (dzianina bawełniano-polipropylenowa – nitka łącząca poliamidowa W2 20 tex PP 84/25x2 /PA66 22/7)

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 79. Rozkład stężeń pary wodnej dla materiału 7 (dzianina bawełniano-polipropylenowa – nitka łącząca poliamidowa W2 20 tex PP 84/25x2 /PA66 22/7)

Numer serii	Stężenie pary wodnej w poszczególnych warstwach, $kg \cdot m^{-3}$		
	Nr 1 = 0	Nr 2 = 0,7325	Nr 3 = 1,465
1	0,0800	0,0535	0,0400
2	0,0800	0,0601	0,0500
3	0,0800	0,0668	0,0600



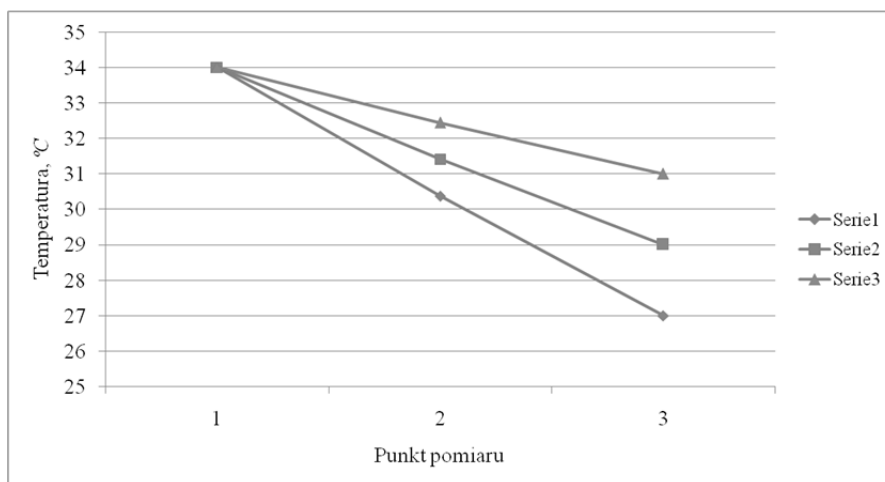
Rys. 147. Rozkład stężeń pary wodnej dla materiału 7 (dzianina bawełniano-polipropylenowa – nitka łącząca poliamidowa W2 20 tex PP 84/25x2 /PA66 22/7)

Źródło: opracowanie własne.

Opór ciepła jest duży w warstwie wewnętrznej czepka, a bardzo nieznaczny w warstwie zewnętrznej. Dlatego wykres w warstwie zewnętrznej jest prawie poziomy. Opór pary wodnej jest również większy w warstwie wewnętrznej, jednak różnice nie są aż tak duże jak dla oporu ciepła. Dlatego kąty pochylenia wykresów do poziomu są różne, jednak nie są praktycznie poziome jak dla wykresu temperatury.

Tabela 80. Rozkład temperatur dla materiału 8 (dzianina bawełniano-poliestrowa – nitka łącząca poliamidowa Baw 20 tex PES 167/96 /PA66 22/7)

Numer serii	Temperatura materiału w poszczególnych warstwach, °C		
	Nr 1 = 0	Nr 2 = 0,7325	Nr 3 = 1,465
1	34,00	30,37	27,00
2	34,00	31,41	29,00
3	34,00	32,44	31,00

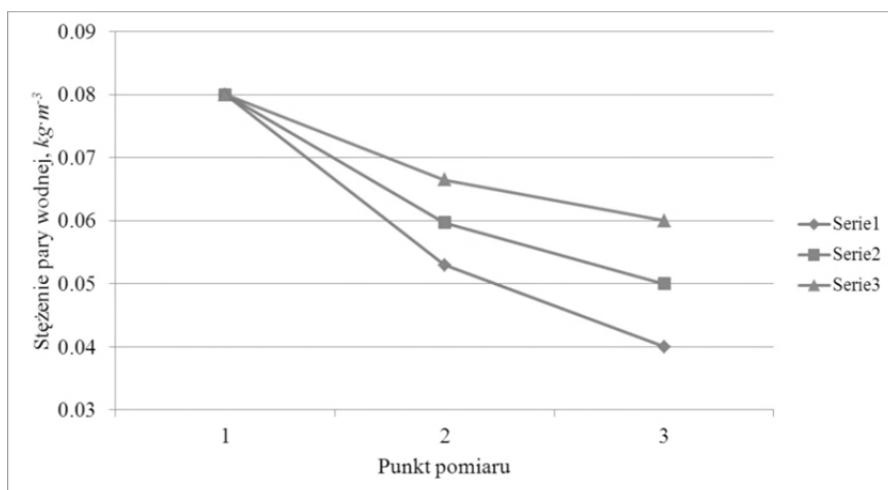


Rys. 148. Rozkład temperatur dla materiału 8 (dzianina bawełniano-poliestrowa – nitka łącząca poliamidowa Baw 20 tex PES 167/96 /PA66 22/7)

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 81. Rozkład stężeń pary wodnej dla materiału 8 (dzianina bawełniano-poliestrowa – nitka łącząca poliamidowa Baw 20 tex PES 167/96 /PA66 22/7)

Numer serii	Stężenie pary wodnej w poszczególnych warstwach, $kg \cdot m^{-3}$		
	Nr 1 = 0	Nr 2 = 0,659	Nr 3 = 1,318
1	0,0800	0,0530	0,0400
2	0,0800	0,0597	0,0500
3	0,0800	0,0665	0,0600



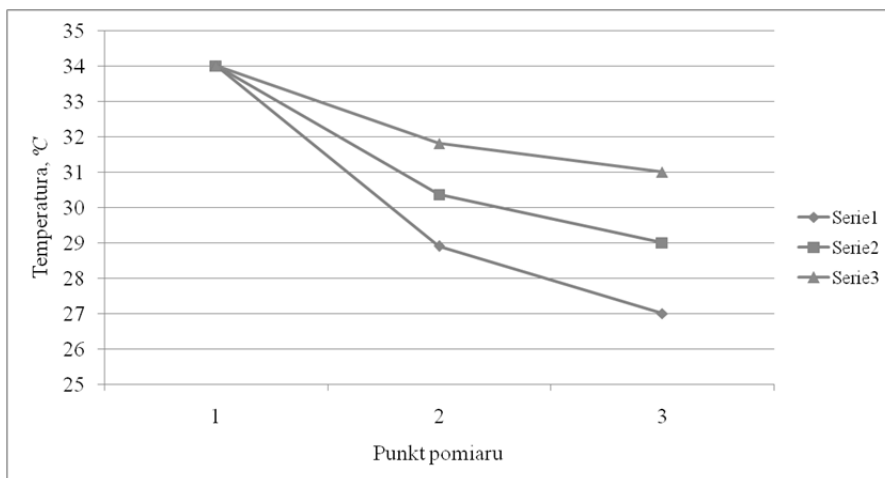
Rys. 149. Rozkład stężeń pary wodnej dla materiału 8 (dzianina bawełniano-poliestrowa – nitka łącząca poliamidowa Baw 20 tex PES 167/96 /PA66 22/7)

Źródło: opracowanie własne.

W przypadku tego materiału występują różne charaktery przebiegów temperatur i stężeń pary wodnej. Dla temperatur jest taki sam w obu warstwach, ponieważ są porównywalne opory cieplne obu materiałów. Dla stężeń pary wodnej jest różny na skutek różnych oporów przepływu wilgoci, co graficznie jest określone różnymi kątami pochylenia do poziomu.

Tabela 82. Rozkład temperatur dla materiału 9 (dzianina bawełniano-poliestrowa – nitka łącząca poliamidowa BawBiel 20 tex PES 167/96/PA66 22/7)

Numer serii	Temperatura materiału w poszczególnych warstwach, °C		
	Nr 1 = 0	Nr 2 = 0,6005	Nr 3 = 1,201
1	34,00	28,90	27,00
2	34,00	30,36	29,00
3	34,00	31,81	31,00

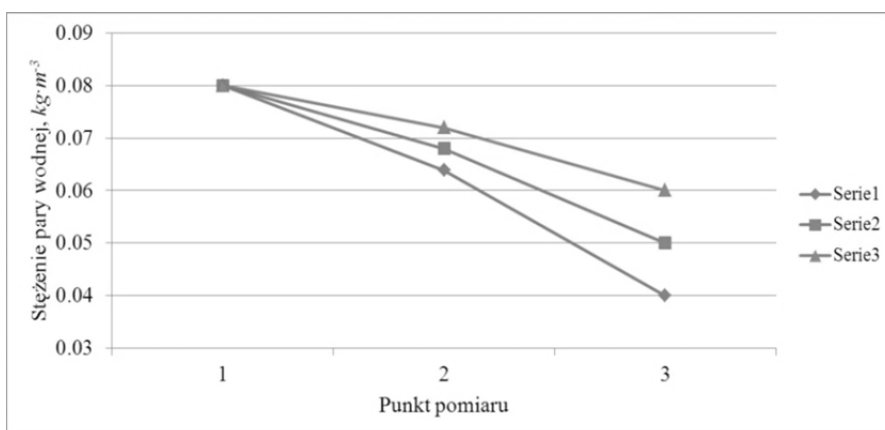


Rys. 150. Rozkład temperatur dla materiału 9 (dzianina bawełniano-poliestrowa – nitka łącząca poliamidowa BawBiel 20 tex PES 167/96/PA66 22/7)

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 83. Rozkład stężeń pary wodnej dla materiału 9 (dzianina bawełniano-poliestrowa – nitka łącząca poliamidowa BawBiel 20 tex PES 167/96/ PA66 22/7)

Numer serii	Stężenie pary wodnej w poszczególnych warstwach, $kg \cdot m^{-3}$		
	Nr 1 = 0	Nr 2 = 0,6005	Nr 3 = 1,201
1	0,0800	0,0639	0,0400
2	0,0800	0,0680	0,0500
3	0,0800	0,0720	0,0600



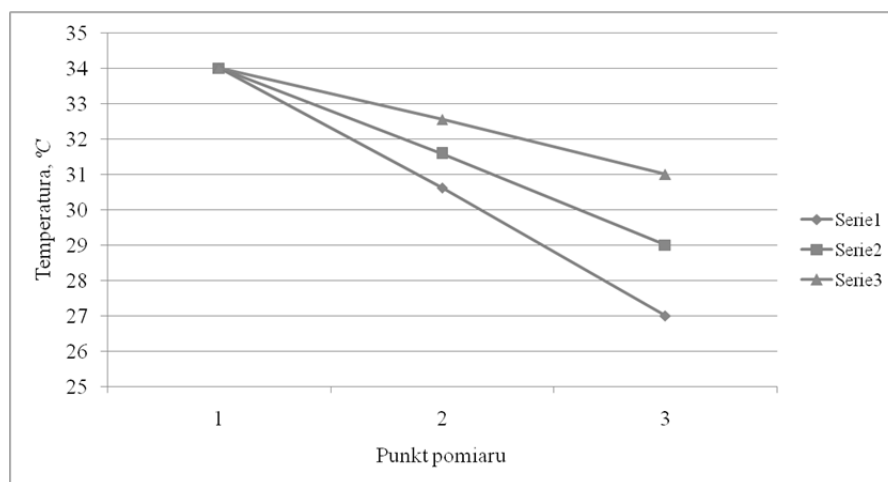
Rys. 151. Rozkład stężeń pary wodnej dla materiału 9 (dzianina bawełniano-poliestrowa – nitka łącząca poliamidowa BawBiel 20 tex PES 167/96/PA66 22/7)

Źródło: opracowanie własne.

Warstwy materiału wykazują przeciwstawne własności przewodzenia ciepła i pary wodnej (wilgoci). Większy opór przewodzenia ciepła jest w warstwie wewnętrznej, tam też są większe spadki temperatury, czemu odpowiada graficznie większy kąt pochylenia do poziomu. Większy opór pary wodnej jest w warstwie zewnętrznej, czemu odpowiada większy spadek stężenia pary wodnej. W konsekwencji bardziej nachylona do poziomu jest część wykresu odpowiadająca warstwie zewnętrznej.

Tabela 84. Rozkład temperatur dla materiału 10 (dzianina bawełniano-poliestrowa – nitka łącząca poliamidowa Baw 20 tex TREVIRA TYPE511M150F 256x1/PA66 22/7)

Numer serii	Temperatura materiału w poszczególnych warstwach, °C		
	Nr 1 = 0	Nr 2 = 0,72	Nr 3 = 1,44
1	34,00	30,62	27,00
2	34,00	31,58	29,00
3	34,00	32,55	31,00



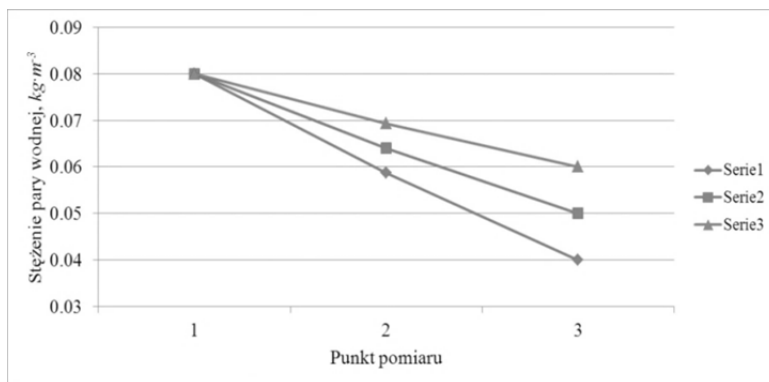
Rys. 152. Rozkład temperatur dla materiału 10 (dzianina bawełniano-poliestrowa – nitka łącząca poliamidowa Baw 20 tex TREVIRA TYPE511M150F 256x1/PA66 22/7)

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 85. Rozkład stężeń pary wodnej dla materiału 10 (dzianina bawełniano-poliestrowa – nitka łącząca poliamidowa Baw 20 tex TREVIRA TYPE511M150F 256x1/PA66 22/7)

Numer serii	Stężenie pary wodnej w poszczególnych warstwach, $kg \cdot m^{-3}$		
	Nr 1 = 0	Nr 2 = 0,72	Nr 3 = 1,44
1	0,0800	0,0587	0,0400
2	0,0800	0,0640	0,0500
3	0,0800	0,0693	0,0600





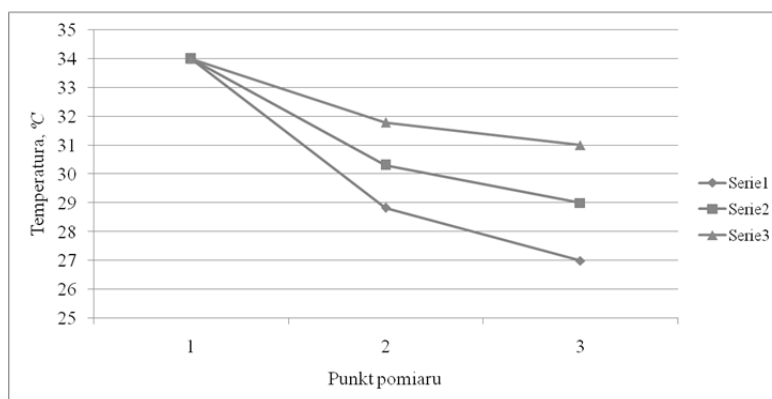
Rys. 153. Rozkład stężeń pary wodnej dla materiału 10 (dzianina bawełniano-poliestrowa – nitka łącząca poliamidowa Baw 20 tex TREVIRA TYPE511M150F 256x1/PA66 22/7)

Źródło: opracowanie własne.

Uzyskane zmienności temperatur i stężeń pary wodnej są w obu przypadkach zbliżone, ponieważ w obu warstwach materiału są zbliżone odpowiednie opory ciepła i pary wodnej.

Tabela 86. Rozkład temperatur dla materiału 11 (dzianina bawełniano-poliestrowa – nitka łącząca poliamidowa Baw Biel 20 tex TREVIRA TYPE511M150F 256x1/PA66 22/7)

Numer serii	Temperatura materiału w poszczególnych warstwach, °C		
	Nr 1 = 0	Nr 2 = 0,642	Nr 3 = 1,284
1	34,00	28,83	27,00
2	34,00	30,31	29,00
3	34,00	31,79	31,00

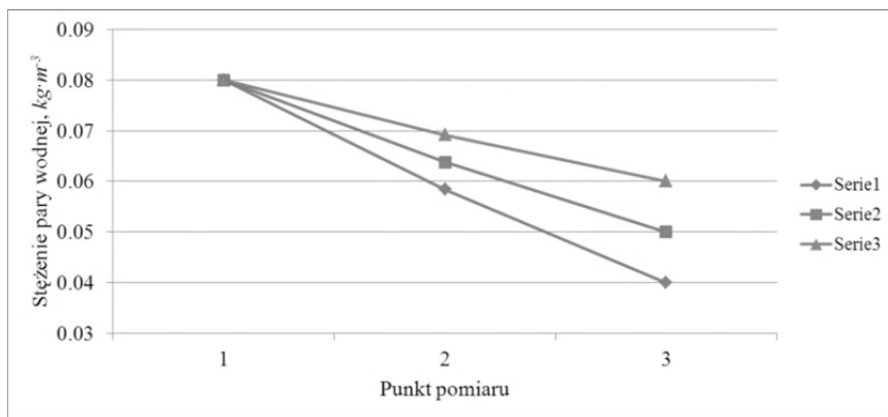


Rys. 154. Rozkład temperatur dla materiału 11 (dzianina bawełniano-poliestrowa – nitka łącząca poliamidowa Baw Biel 20 tex TREVIRA TYPE511M150F 256x1/PA66 22/7)

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 87. Rozkład stężeń pary wodnej dla materiału 11 (dzianina bawełniano-poliestrowa – nitka łącząca poliamidowa Baw Biel 20 tex TREVIRA TYPE511M150F 256x1/PA66 22/7)

Numer serii	Stężenie pary wodnej w poszczególnych warstwach, $kg \cdot m^{-3}$		
	Nr 1 = 0	Nr 2 = 0,642	Nr 3 = 1,284
1	0,0800	0,0584	0,0400
2	0,0800	0,0638	0,0500
3	0,0800	0,0692	0,0600



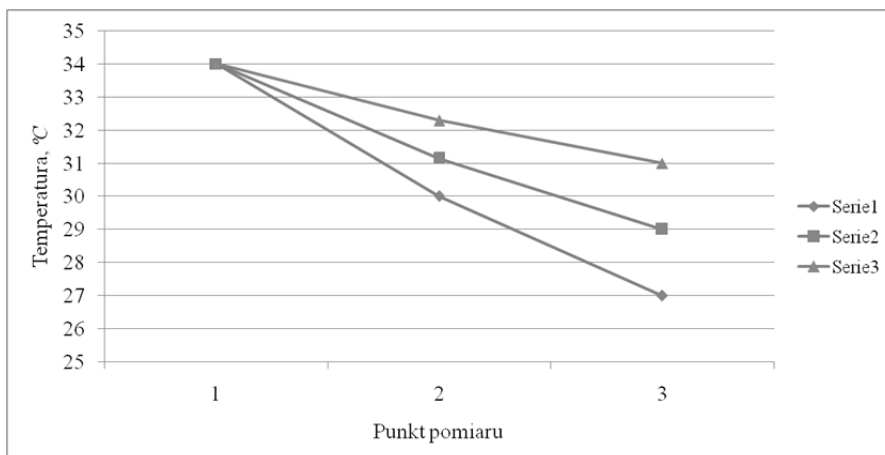
Rys. 155. Rozkład stężeń pary wodnej dla materiału 11 (dzianina bawełniano-poliestrowa – nitka łącząca poliamidowa Baw Biel 20 tex TREVIRA TYPE511M150F 256x1/PA66 22/7)

Źródło: opracowanie własne.

Materiał warstwy wewnętrznej ma większy opór przewodzenia ciepła niż materiał warstwy zewnętrznej, dlatego spadki temperatury są w nim większe. Kąt pochylenia wykresu do poziomu jest dla warstwy wewnętrznej większy niż zewnętrznej. Opory pary wodnej są podobne dla obu warstw tego materiału, co graficznie jest wyrażone takimi samymi kątami pochylenia do poziomu w obu warstwach.

Tabela 88. Rozkład temperatur dla materiału 12 (dzianina bawełniano-poliestrowa – nitka łącząca poliamidowa Baw 24 tex PES 167/96 /PA66 22/7)

Numer serii	Temperatura materiału w poszczególnych warstwach, °C		
	Nr 1 = 0	Nr 2 = 0,5955	Nr 3 = 1,191
1	34,00	30,01	27,00
2	34,00	31,15	29,00
3	34,00	32,29	31,00

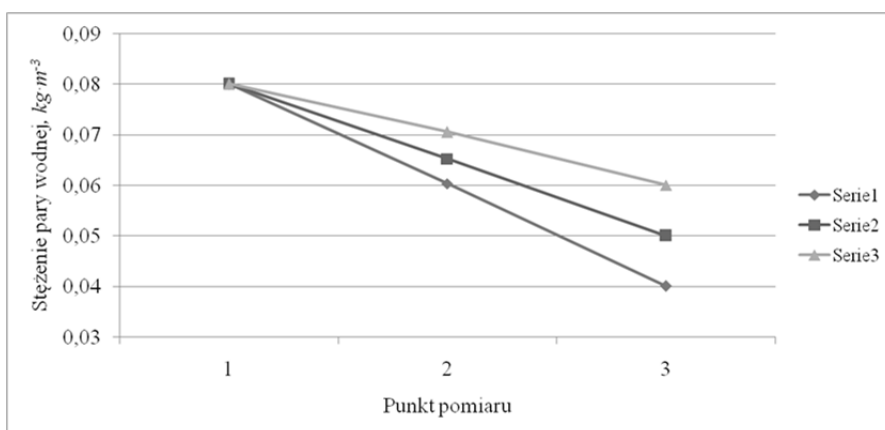


Rys. 156. Rozkład temperatur dla materiału 12 (dzianina bawełniano-poliestrowa – nitka łącząca poliamidowa Baw 24 tex PES 167/96 /PA66 22/7)

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 89. Rozkład stężeń pary wodnej dla materiału 12 (dzianina bawełniano-poliestrowa – nitka łącząca poliamidowa Baw 24 tex PES 167/96 /PA66 22/7)

Numer serii	Stężenie pary wodnej w poszczególnych warstwach, $kg \cdot m^{-3}$		
	Nr 1 = 0	Nr 2 = 0,5955	Nr 3 = 1,191
1	0,0800	0,0603	0,0400
2	0,0800	0,0652	0,0500
3	0,0800	0,0701	0,0600



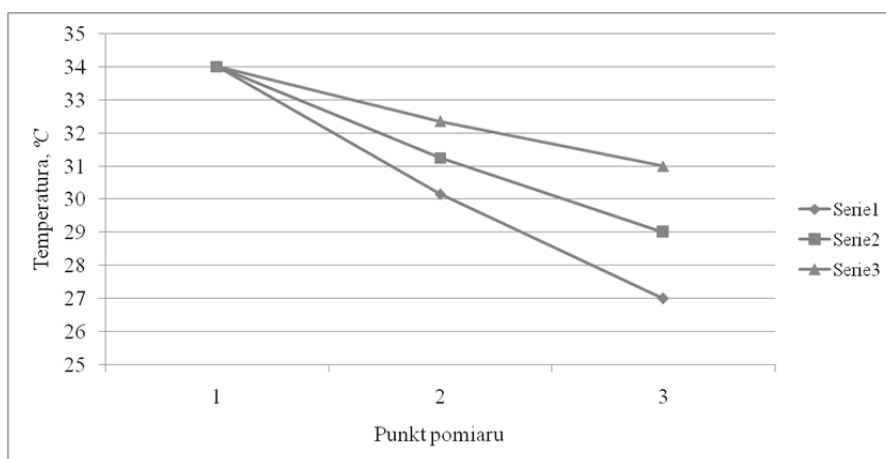
Rys. 157. Rozkład stężeń pary wodnej dla materiału 12 (dzianina bawełniano-poliestrowa – nitka łącząca poliamidowa Baw 24 tex PES 167/96 /PA66 22/7)

Źródło: opracowanie własne.

Wykresy zmienności temperatur w obu warstwach są bardzo zbliżone, ponieważ opory ciepła są podobne dla obu materiałów. Analogiczna jest zmienność stężeń pary wodnej, co wynika z podobnych oporów przepływu pary wodnej. W konsekwencji kąty pochylenia obu wykresów do poziomu są zbliżone dla odpowiednich wykresów temperatur i stężeń pary wodnej.

Tabela 90. Rozkład temperatur dla materiału 13 (dzianina bawełniano-poliamidowa – nitka łącząca poliamidowa Baw 20 tex PA66 78/68x2, PA66 22/7)

Numer serii	Temperatura materiału w poszczególnych warstwach, °C		
	Nr 1 = 0	Nr 2 = 0,8665	Nr 3 = 1,733
1	34,00	30,15	27,00
2	34,00	31,25	29,00
3	34,00	32,35	31,00

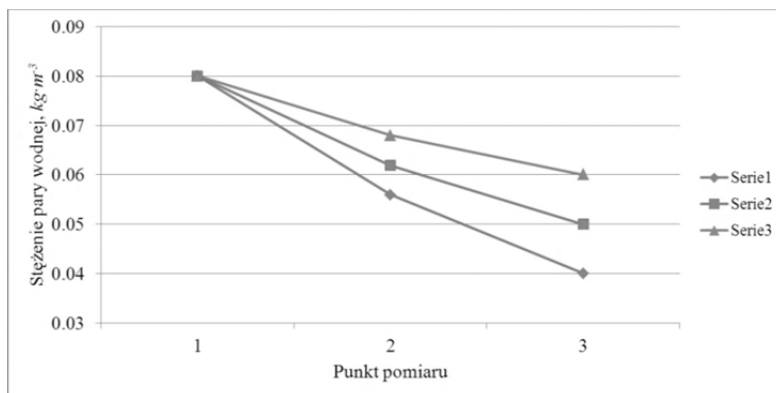


Rys. 158. Rozkład temperatur dla materiału 13 (dzianina bawełniano-poliamidowa – nitka łącząca poliamidowa Baw 20 tex PA66 78/68x2, PA66 22/7)

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 91. Rozkład stężeń pary wodnej dla materiału 13 (dzianina bawełniano-poliamidowa – nitka łącząca poliamidowa Baw 20 tex PA66 78/68x2, PA66 22/7)

Numer serii	Stężenie pary wodnej w poszczególnych warstwach, $kg \cdot m^{-3}$		
	Nr 1 = 0	Nr 2 = 0,8665	Nr 3 = 1,733
1	0,0800	0,0559	0,0400
2	0,0800	0,0619	0,0500
3	0,0800	0,0680	0,0600



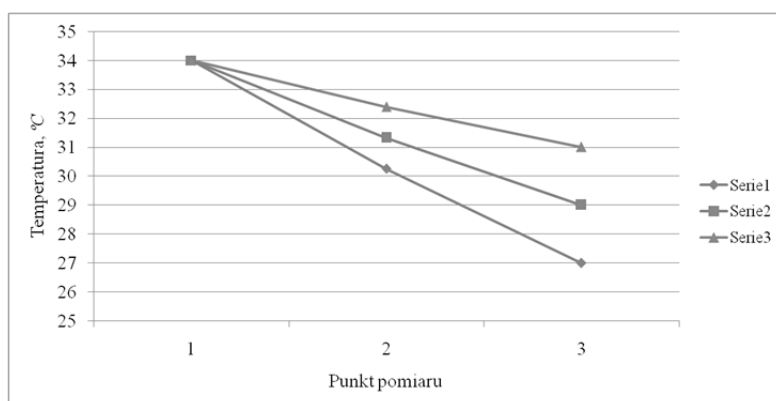
Rys. 159. Rozkład stężeń pary wodnej dla materiału 13 (dzianina bawełniano-poliamidowa – nitka łącząca poliamidowa Baw 20 tex PA66 78/68x2, PA66 22/7)

Źródło: opracowanie własne.

Zmienności temperatur i stężeń pary wodnej są w obu przypadkach zbliżone, czyli podobny jest charakter wszystkich otrzymanych wykresów. Zarówno opory ciepła, jak i pary wodnej są nieznacznie większe w wewnętrznej warstwie materiału, dlatego ich kąty pochylenia do poziomu są nieco większe.

Tabela 92. Rozkład temperatur dla materiału 14 (dzianina bawełniano-poliamidowa – nitka łącząca poliamidowa Baw Biel 20 tex PA66 140f102MXRD (TASLAN)/PA66 22/7)

Numer serii	Temperatura materiału w poszczególnych warstwach, °C		
	Nr 1 = 0	Nr 2 = 0,652	Nr 3 = 1,304
1	34,00	30,25	27,00
2	34,00	31,32	29,00
3	34,00	32,39	31,00

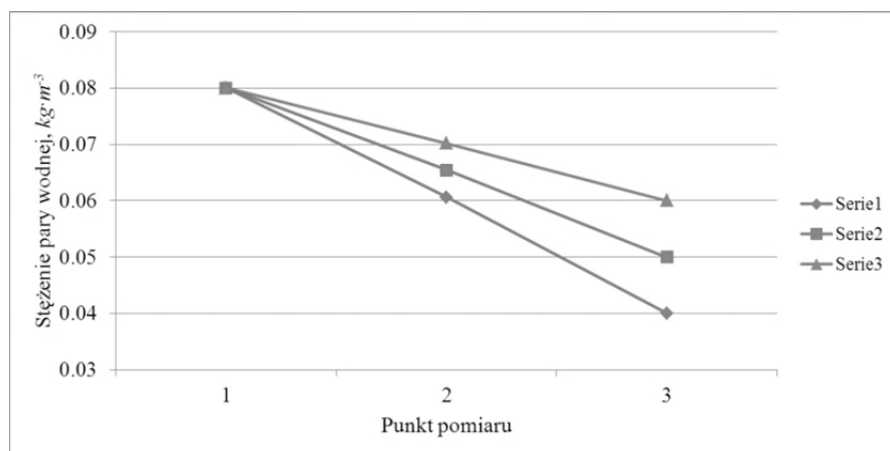


Rys. 160. Rozkład temperatur dla materiału 14 (dzianina bawełniano-poliamidowa – nitka łącząca poliamidowa Baw Biel 20 tex PA66 140f102MXRD (TASLAN)/PA66 22/7)

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 93. Rozkład stężeń pary wodnej dla materiału 14 (dzianina bawełniano-poliamidowa – nitka łącząca poliamidowa Baw Biel 20 tex PA66 140f102MXRD (TASLAN)/PA66 22/7)

Numer serii	Stężenie pary wodnej w poszczególnych warstwach, $kg \cdot m^{-3}$		
	Nr 1 = 0	Nr 2 = 0,652	Nr 3 = 1,304
1	0,0800	0,0606	0,0400
2	0,0800	0,0654	0,0500
3	0,0800	0,0702	0,0600



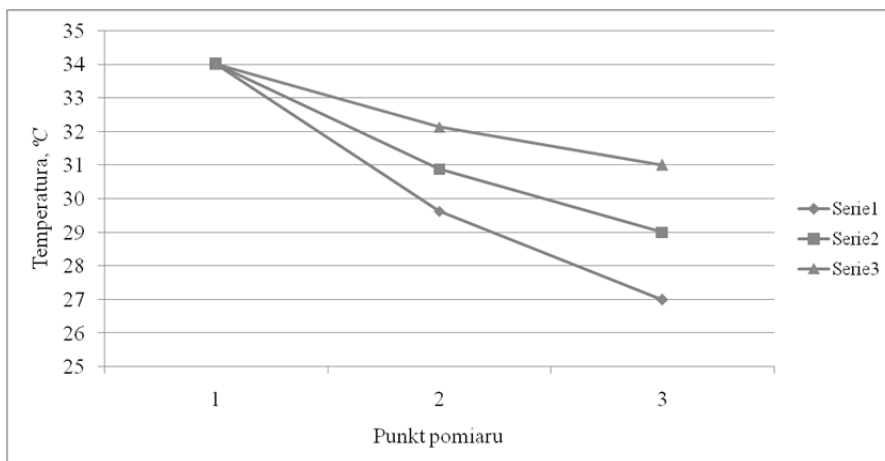
Rys. 161. Rozkład stężeń pary wodnej dla materiału 14 (dzianina bawełniano-poliamidowa – nitka łącząca poliamidowa Baw Biel 20 tex PA66 140f102MXRD (TASLAN)/PA66 22/7)

Źródło: opracowanie własne.

Uzyskane zmienności temperatur są w obu przypadkach zbliżone, podobnie jak i rozkłady stężeń pary wodnej w obu warstwach. Odpowiednie opory ciepła mają podobne wartości w obu warstwach materiału; to samo dotyczy też pary wodnej. Dlatego kąty pochylenia obu odcinków prostych do poziomu są zbliżone, odpowiednio dla wykresów temperatury i stężeń pary wodnej.

Tabela 94. Rozkład temperatur dla materiału 15 (dzianina bambusowo-polipropylenowa – nitka łącząca poliamidowa Bambus 20 tex PP 84/25x2 /PA66 22/7)

Numer serii	Temperatura materiału w poszczególnych warstwach, °C		
	Nr 1 = 0	Nr 2 = 0,659	Nr 3 = 1,318
1	34,00	29,63	27,00
2	34,00	30,88	29,00
3	34,00	32,13	31,00

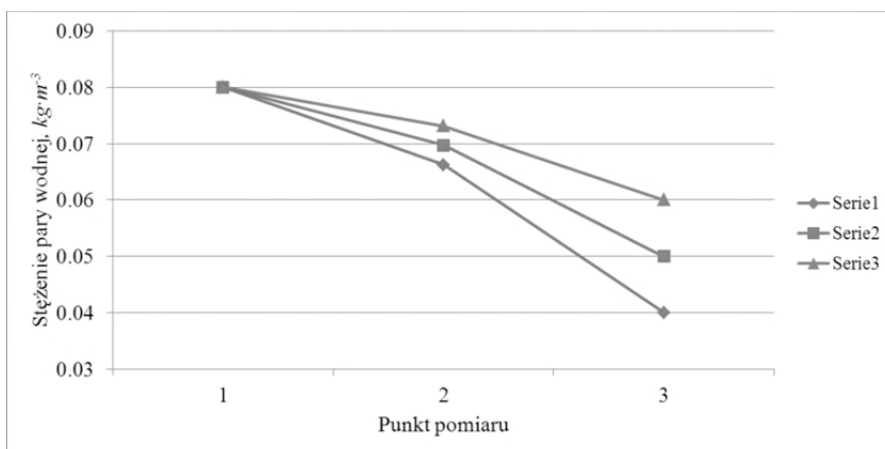


Rys. 162. Rozkład temperatur dla materiału 15 (dzianina bambusowo-polipropylenowa – nitka łącząca poliamidowa Bambus 20 tex PP 84/25x2 /PA66 22/7)

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 95. Rozkład stężeń pary wodnej dla materiału 15 (dzianina bambusowo-polipropylenowa – nitka łącząca poliamidowa Bambus 20 tex PP 84/25x2 /PA66 22/7)

Numer serii	Stężenie pary wodnej w poszczególnych warstwach, $kg \cdot m^{-3}$		
	Nr 1 = 0	Nr 2 = 0,659	Nr 3 = 1,318
1	0,0800	0,0662	0,0400
2	0,0800	0,0697	0,0500
3	0,0800	0,0731	0,0600



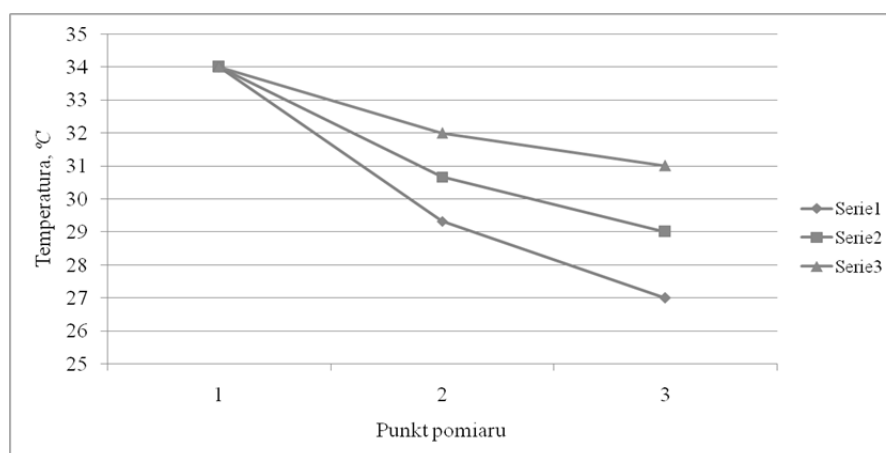
Rys. 163. Rozkład stężeń pary wodnej dla materiału 15 (dzianina bambusowo-polipropylenowa – nitka łącząca poliamidowa Bambus 20 tex PP 84/25x2 /PA66 22/7)

Źródło: opracowanie własne.

Podobnie jak w przypadku materiału 9, ten zestaw materiałów wykazuje zupełnie różne własności przewodzenia ciepła i masy. Większym oporem cieplnym wykazuje się warstwa bliżej materiału, czyli charakteryzuje się większym spadkiem temperatur. Wykres ma nieznacznie większy kąt pochylenia do poziomu. Większy opór pary wodnej ma warstwa zewnętrzna w stosunku do skóry wczesniaka, dlatego bardziej pochylone do poziomu są części wykresu w zewnętrznej warstwie materiału.

Tabela 96. Rozkład temperatur dla materiału 16 (dzianina bambusowo-polipropylenowa – nitka łącząca poliamidowa Bambus 20 tex PP 84/25x2/PA66 22/7 biały)

Numer serii	Temperatura materiału w poszczególnych warstwach, °C		
	Nr 1 = 0	Nr 2 = 0,696	Nr 3 = 1,392
1	34,00	29,32	27,00
2	34,00	30,66	29,00
3	34,00	31,99	31,00



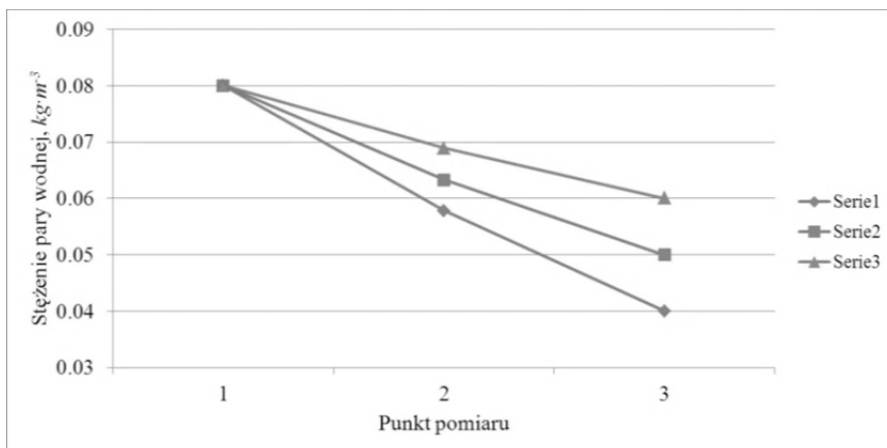
Rys. 164. Rozkład temperatur dla materiału 16 (dzianina bambusowo-polipropylenowa – nitka łącząca poliamidowa Bambus 20 tex PP 84/25x2/PA66 22/7 biały)

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 97. Rozkład stężeń pary wodnej dla materiału 16 (dzianina bambusowo-polipropylenowa – nitka łącząca poliamidowa Bambus 20 tex PP 84/25x2/PA66 22/7 biały)

Numer serii	Stężenie pary wodnej w poszczególnych warstwach, $kg \cdot m^{-3}$		
	Nr 1 = 0	Nr 2 = 0,696	Nr 3 = 1,392
1	0,0800	0,0578	0,0400
2	0,0800	0,0633	0,0500
3	0,0800	0,0689	0,0600





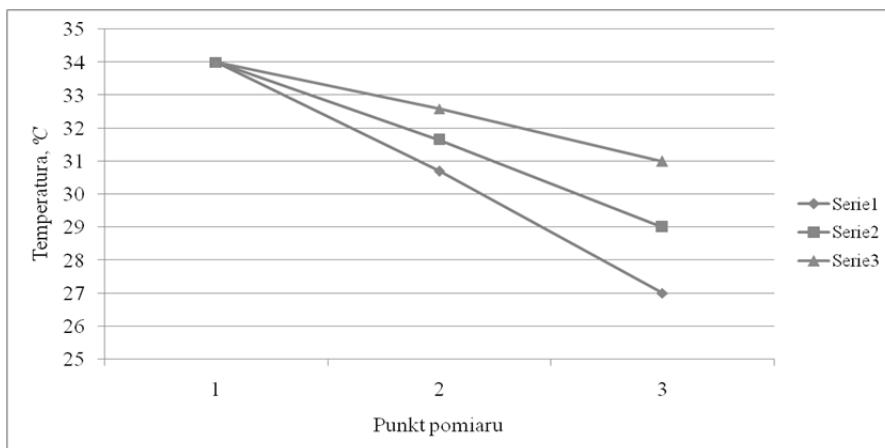
Rys. 165. Rozkład stężeń pary wodnej dla materiału 16 (dzianina bambusowo-polipropylenowa – nitka łącząca poliamidowa Bambus 20 tex PP 84/25x2/PA66 22/7 biały)

Źródło: opracowanie własne.

Uzyskane charaktery zmienności temperatur są różne w obu warstwach, ponieważ opory cieplne są nierówne co do wartości. Nieco większa wartość oporu cieplnego jest ponownie w wewnętrznej warstwie materiału, tam występują też większe spadki tej zmiennej stanu. Zmienność stężeń pary wodnej jest praktycznie taka sama w obu warstwach, ponieważ opory pary wodnej są porównywalne w obu warstwach. Dlatego kąty nachylenia poszczególnych odcinków do poziomu są takie same dla obu części wykresów.

Tabela 98. Rozkład temperatur dla materiału 17 (dzianina bambusowo-poliestrowa – nitka łącząca poliamidowa Bambus 20 tex PES 167/96x2 /PA66 22/7)

Numer serii	Temperatura materiału w poszczególnych warstwach, °C		
	Nr 1 = 0	Nr 2 = 0,6325	Nr 3 = 1,265
1	34,00	30,70	27,00
2	34,00	31,65	29,00
3	34,00	32,59	31,00

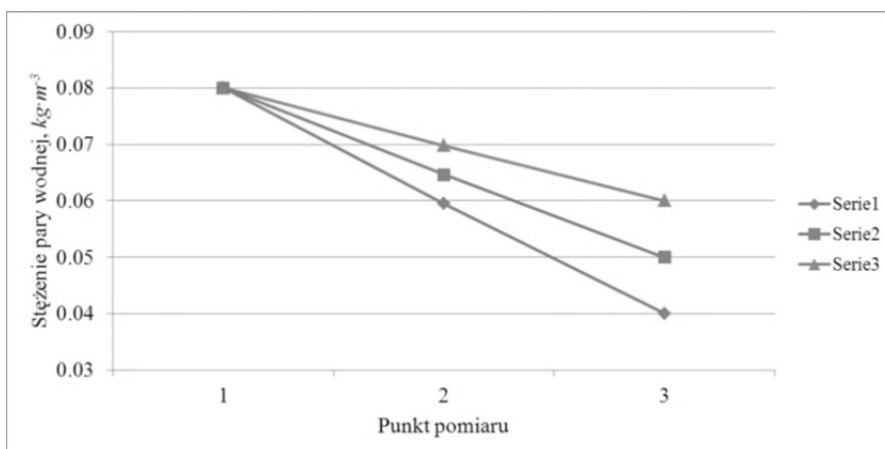


Rys. 166. Rozkład temperatur dla materiału 17 (dzianina bambusowo-poliestrowa – nitka łącząca poliamidowa Bambus 20 tex PES 167/96x2 /PA66 22/7)

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 99. Rozkład stężeń pary wodnej dla materiału 17 (dzianina bambusowo-poliestrowa – nitka łącząca poliamidowa Bambus 20 tex PES 167/96x2 /PA66 22/7)

Numer serii	Stężenie pary wodnej w poszczególnych warstwach, $kg \cdot m^{-3}$		
	Nr 1 = 0	Nr 2 = 0,6325	Nr 3 = 1,265
1	0,0800	0,0595	0,0400
2	0,0800	0,0646	0,0500
3	0,0800	0,0698	0,0600



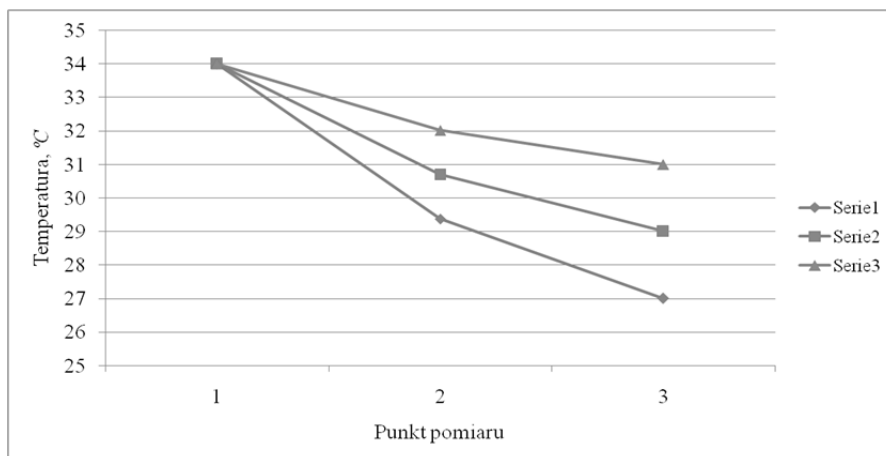
Rys. 167. Rozkład stężeń pary wodnej dla materiału 17 (dzianina bambusowo-poliestrowa – nitka łącząca poliamidowa Bambus 20 tex PES 167/96x2 /PA66 22/7)

Źródło: opracowanie własne.

Uzyskane zmienności temperatur są w obu przypadkach zbliżone, analogiczne są też wykresy stężeń pary wodnej. Odpowiednie opory ciepła są zbliżone w obu warstwach materiału. Opory przenikania pary wodnej są również porównywalne w obu przypadkach. Dlatego kąty pochylenia obu odcinków prostych są odpowiednio takie same dla wykresów temperatury, jak i dla wykresów stężeń pary wodnej.

Tabela 100. Rozkład temperatur dla materiału 18 (dzianina bambusowo-poliestrowa – nitka łącząca poliamidowa Bambus 20 tex TREVIRA TYPE511M150F 256x1/PA66 22/7)

Numer serii	Temperatura materiału w poszczególnych warstwach, °C		
	Nr 1 = 0	Nr 2 = 0,6785	Nr 3 = 1,357
1	34,00	29,37	27,00
2	34,00	30,69	29,00
3	34,00	32,02	31,00

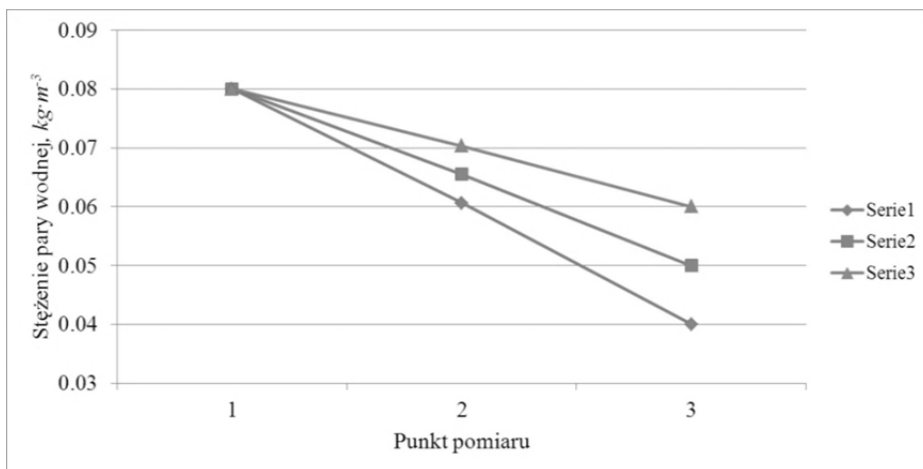


Rys. 168. Rozkład temperatur dla materiału 18 (dzianina bambusowo-poliestrowa – nitka łącząca poliamidowa Bambus 20 tex TREVIRA TYPE511M150F 256x1/PA66 22/7)

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 101. Rozkład stężeń pary wodnej dla materiału 18 (dzianina bambusowo-poliestrowa – nitka łącząca poliamidowa Bambus 20 tex TREVIRA TYPE511M150F 256x1/PA66 22/7)

Numer serii	Stężenie pary wodnej w poszczególnych warstwach, $kg \cdot m^{-3}$		
	Nr 1 = 0	Nr 2 = 0,6785	Nr 3 = 1,357
1	0,0800	0,0606	0,0400
2	0,0800	0,0655	0,0500
3	0,0800	0,0703	0,0600



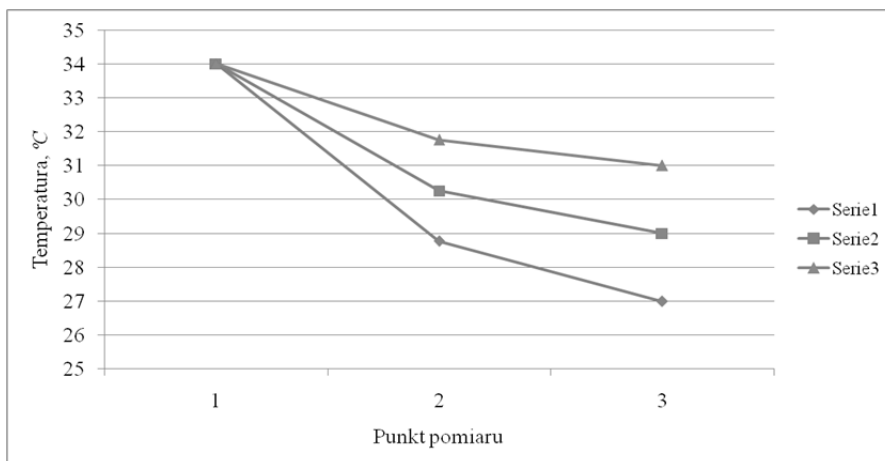
Rys. 169. Rozkład stężeń pary wodnej dla materiału 18 (dzianina bambusowo-poliestrowa – nitka łącząca poliamidowa Bambus 20 tex TREVIRA TYPE511M150F 256x1/PA66 22/7)

Źródło: opracowanie własne.

Zmienności temperatur są różne w obu warstwach, ponieważ opory cieplne są różne. Nieco większa wartość oporu cieplnego jest ponownie w wewnętrznej warstwie materiału, dlatego są różne kąty nachylenia wykresów do poziomu. Zmienność stężeń pary wodnej jest taka sama w obu warstwach, ponieważ opory pary wodnej są porównywalne. Kąty nachylenia poszczególnych odcinków wykresów stężeń do poziomu są więc takie same dla obu warstw.

Tabela 102. Rozkład temperatur dla materiału 19 (dzianina bambusowo-poliamidowa – nitka łącząca poliamidowa Bambus 20 tex PA66 140f102MXRD TASLAN/PA66 22/7)

Numer serii	Temperatura materiału w poszczególnych warstwach, °C		
	Nr 1 = 0	Nr 2 = 0,581	Nr 3 = 1,162
1	34,00	28,77	27,00
2	34,00	30,26	29,00
3	34,00	31,76	31,00

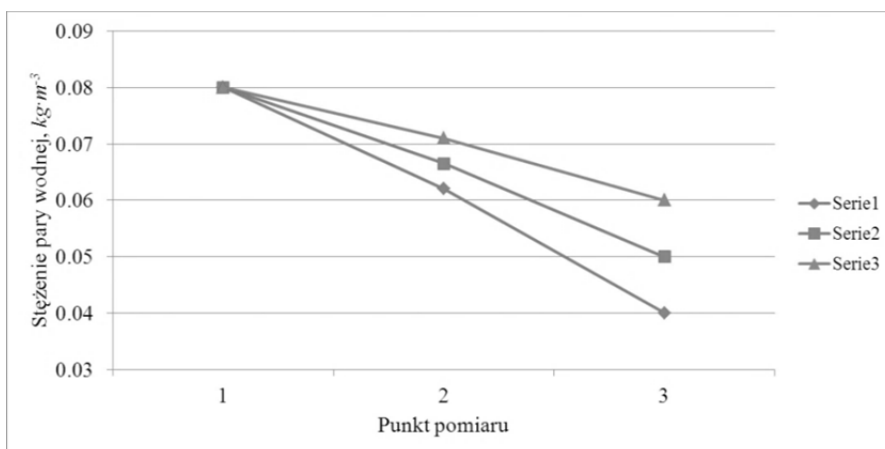


Rys. 170. Rozkład temperatur dla materiału 19 (dzianina bambusowo-poliamidowa – nitka łącząca poliamidowa Bambus 20 tex PA66 140f102MXRD TASLAN/PA66 22/7)

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 103. Rozkład stężeń pary wodnej dla materiału 19 (dzianina bambusowo-poliamidowa – nitka łącząca poliamidowa Bambus 20 tex PA66 140f102MXRD TASLAN/PA66 22/7)

Numer serii	Stężenie pary wodnej w poszczególnych warstwach, $kg \cdot m^{-3}$		
	Nr 1 = 0	Nr 2 = 0,581	Nr 3 = 1,162
1	0,0800	0,0620	0,0400
2	0,0800	0,0665	0,0500
3	0,0800	0,0710	0,0600



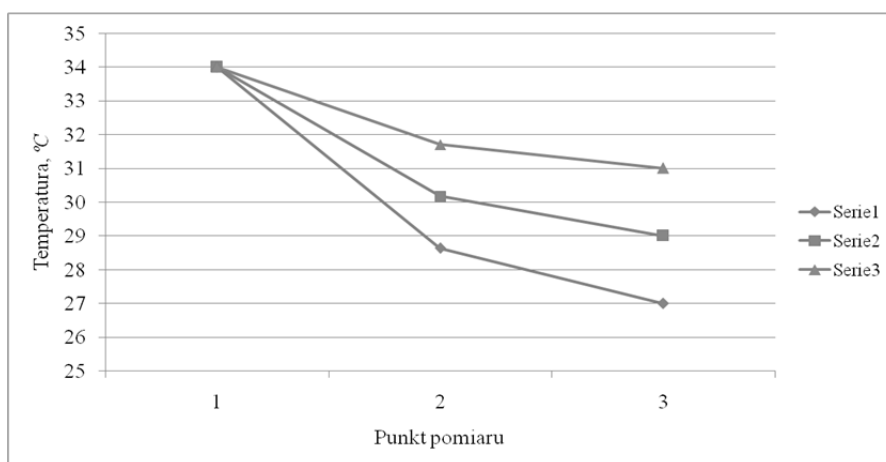
Rys. 171. Rozkład stężeń pary wodnej dla materiału 19 (dzianina bambusowo-poliamidowa – nitka łącząca poliamidowa Bambus 20 tex PA66 140f102MXRD TASLAN/PA66 22/7)

Źródło: opracowanie własne.

Prezentowany zestaw materiałów wykazuje zupełnie różne własności przewodzenia ciepła i masy, patrz również materiał 9. Większym oporem cieplnym wykazuje się warstwa bliżej ciała noworodka, daje większe spadki temperatury. Większy opór pary wodnej ma warstwa zewnętrzna w stosunku do skóry wcześniaka, ma zatem własności zatrzymywania wilgoci. Stąd zupełnie różny charakter uzyskanych wykresów temperatur i stężeń pary wodnej. Większe kąty pochylenia do poziomu mają: wykres temperatury w warstwie wewnętrznej, odpowiednio wykres stężenia pary wodnej w warstwie zewnętrznej.

Tabela 104. Rozkład temperatur dla materiału 20 (dzianina wiskozowo-polipropylenowa – nitka łącząca poliamidowa Wiskoza 20 tex PP 84/25x2 /PA66 22/7)

Numer serii	Temperatura materiału w poszczególnych warstwach, °C		
	Nr 1 = 0	Nr 2 = 0,6885	Nr 3 = 1,377
1	34,00	28,63	27,00
2	34,00	30,17	29,00
3	34,00	31,70	31,00

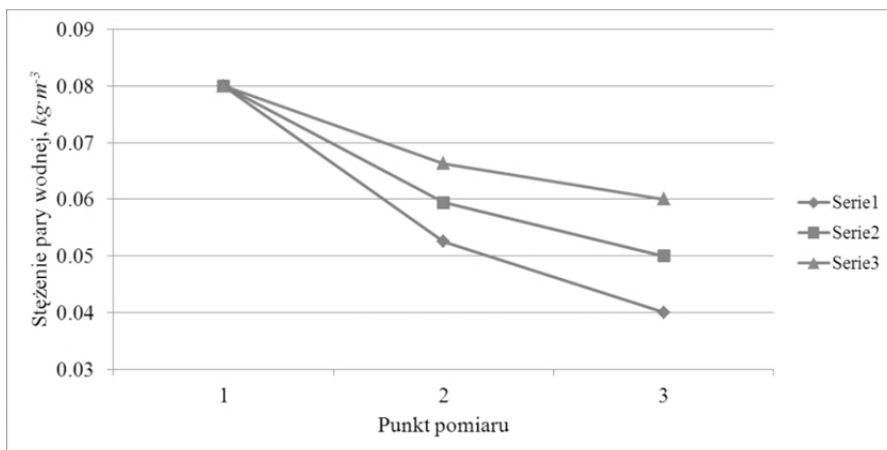


Rys. 172. Rozkład temperatur dla materiału 20 (dzianina wiskozowo-polipropylenowa – nitka łącząca poliamidowa Wiskoza 20 tex PP 84/25x2 /PA66 22/7)

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 105. Rozkład stężeń pary wodnej dla materiału 20 (dzianina wiskozowo-polipropylenowa – nitka łącząca poliamidowa Wiskoza 20 tex PP 84/25x2 /PA66 22/7)

Numer serii	Stężenie pary wodnej w poszczególnych warstwach, $kg \cdot m^{-3}$		
	Nr 1 = 0	Nr 2 = 0,6885	Nr 3 = 1,377
1	0,0800	0,0525	0,0400
2	0,0800	0,0594	0,0500
3	0,0800	0,0663	0,0600



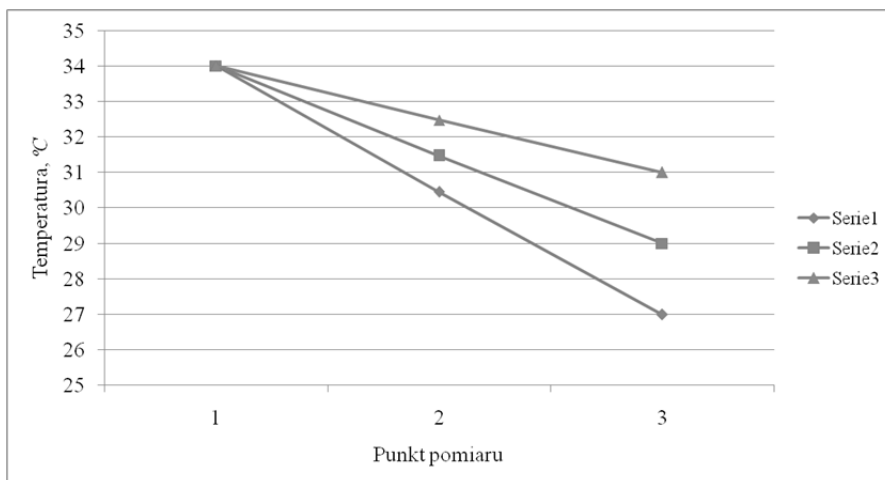
Rys. 173. Rozkład stężeń pary wodnej dla materiału 20 (dzianina wiskozowo-polipropylenowa – nitka łącząca poliamidowa Wiskoza 20 tex PP 84/25x2 /PA66 22/7)

Źródło: opracowanie własne.

Zmienności temperatur i stężeń pary wodnej są zbliżone, ponieważ rozkład oporów ciepła i pary wodnej jest podobny dla obu warstw. Większe opory ciepła i pary wodnej ma warstwa wewnętrzna materiału, stąd ich większy kąt nachylenia wszystkich wykresów w tych warstwach do poziomu. Mniejsze opory występują w warstwie zewnętrznej, co skutkuje mniejszym kątem nachylenia do poziomu.

Tabela 106. Rozkład temperatur dla materiału 21 (dzianina wiskozowo-poliestrowa – nitka łącząca poliamidowa Wiskoza 20 tex PES 167/96/ PA66 22/7)

Numer serii	Temperatura materiału w poszczególnych warstwach, °C		
	Nr 1 = 0	Nr 2 = 0,6275	Nr 3 = 1,255
1	34,00	30,45	27,00
2	34,00	31,47	29,00
3	34,00	32,48	31,00

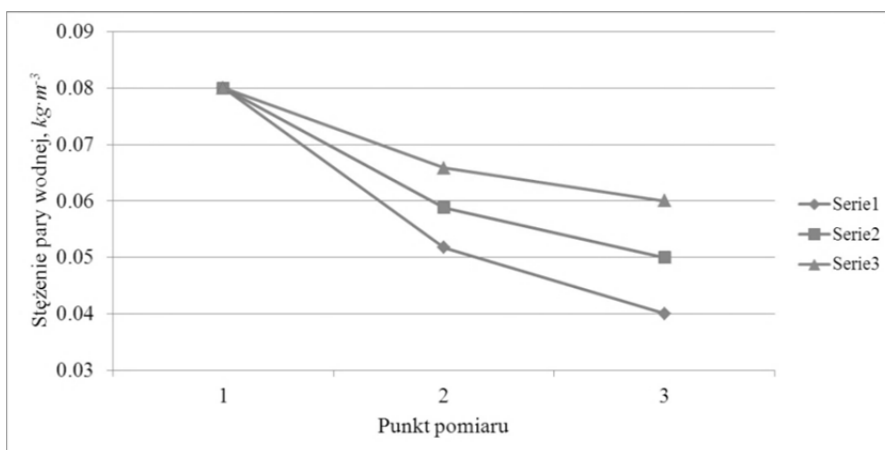


Rys. 174. Rozkład temperatur dla materiału 21 (dzianina wiskozowo-poliestrowa – nitka łącząca poliamidowa Wiskoza 20 tex PES 167/96/ PA66 22/7)

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 107. Rozkład stężeń pary wodnej dla materiału 21 (dzianina wiskozowo-poliestrowa – nitka łącząca poliamidowa Wiskoza 20 tex PES 167/96/ PA66 22/7)

Numer serii	Stężenie pary wodnej w poszczególnych warstwach, $kg \cdot m^{-3}$		
	Nr 1 = 0	Nr 2 = 0,6275	Nr 3 = 1,255
1	0,0800	0,0517	0,0400
2	0,0800	0,0588	0,0500
3	0,0800	0,0658	0,0600



Rys. 175. Rozkład stężeń pary wodnej dla materiału 21 (dzianina wiskozowo-poliestrowa – nitka łącząca poliamidowa Wiskoza 20 tex PES 167/96/ PA66 22/7)

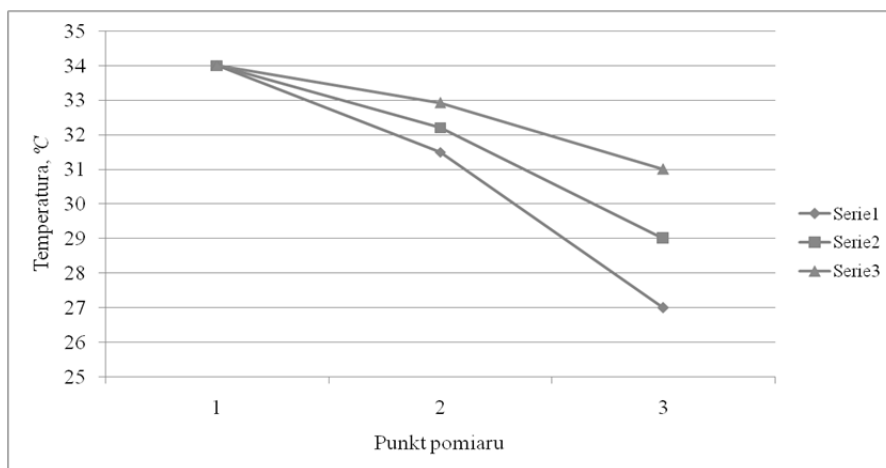
Źródło: opracowanie własne.



Dla materiału 21 opory ciepła są zbliżone dla obu warstw, dlatego kąty pochylenia wykresu na obu odcinkach są podobne, wykresy stanowią praktycznie linie proste. Opory pary wodnej są większe w warstwie wewnętrznej, czyli kąty pochylenia w tej warstwie są większe.

Tabela 108. Rozkład temperatur dla materiału 22 (dzianina wiskozowa dwuwarstwowa – nitka łącząca poliamidowa Wiskoza 20 tex Wiskoza 20 tex /PA66 22/7)

Numer serii	Temperatura materiału w poszczególnych warstwach, °C		
	Nr 1 = 0	Nr 2 = 0,5955	Nr 3 = 1,191
1	34,00	31,49	27,00
2	34,00	32,20	29,00
3	34,00	32,92	31,00

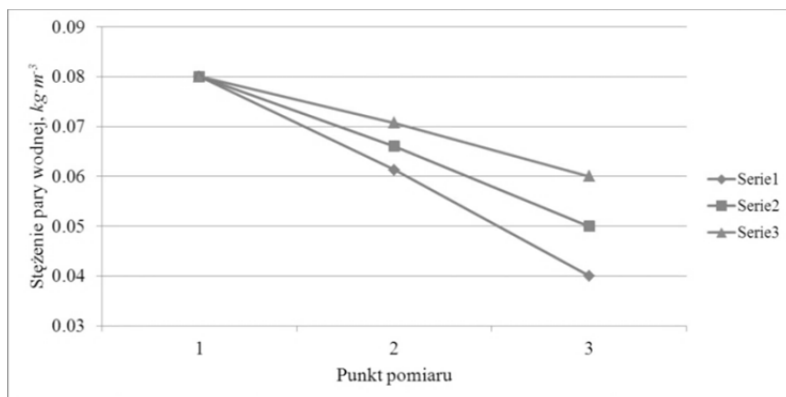


Rys. 176. Rozkład temperatur dla materiału 22 (dzianina wiskozowa dwuwarstwowa – nitka łącząca poliamidowa Wiskoza 20 tex Wiskoza 20 tex /PA66 22/7)

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 109. Rozkład stężeń pary wodnej dla materiału 22 (dzianina wiskozowa dwuwarstwowa – nitka łącząca poliamidowa Wiskoza 20 tex Wiskoza 20 tex/PA66 22/7)

Numer serii	Stężenie pary wodnej w poszczególnych warstwach, $kg \cdot m^{-3}$		
	Nr 1 = 0	Nr 2 = 0,5955	Nr 3 = 1,191
1	0,0800	0,0613	0,0400
2	0,0800	0,0660	0,0500
3	0,0800	0,0707	0,0600



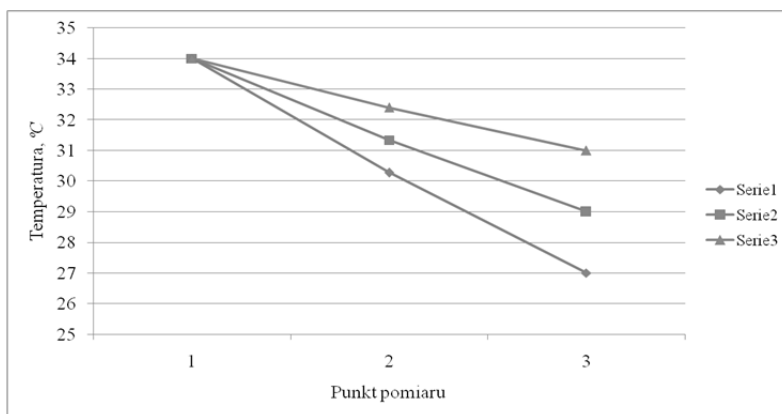
Rys. 177. Rozkład stężeń pary wodnej dla materiału 22 (dzianina wiskozowa dwuwarstwowa – nitka łącząca poliamidowa Wiskoza 20 tex Wiskoza 20 tex /PA66 22/7)

Źródło: opracowanie własne.

Dla materiału 22 warstwa zewnętrzna ma większy opór cieplny, czyli następuje w niej większy spadek temperatury. Dlatego kąt nachylenia wykresu do poziomu jest większy niż dla warstwy wewnętrznej. Materiały obu warstw mają zbliżone opory pary wodnej, dlatego wartości kątów nachylenia obu części wykresów do poziomu mają podobną wartość.

Tabela 110. Rozkład temperatur dla materiału 23 (dzianina bawełniana dwuwarstwowa – nitka łącząca poliamidowa BawBiel 20 tex BawBiel 15 tex /PA66 22/7)

Numer serii	Temperatura materiału w poszczególnych warstwach, °C		
	Nr 1 = 0	Nr 2 = 0,613	Nr 3 = 1,226
1	34,00	30,28	27,00
2	34,00	31,34	29,00
3	34,00	32,40	31,00

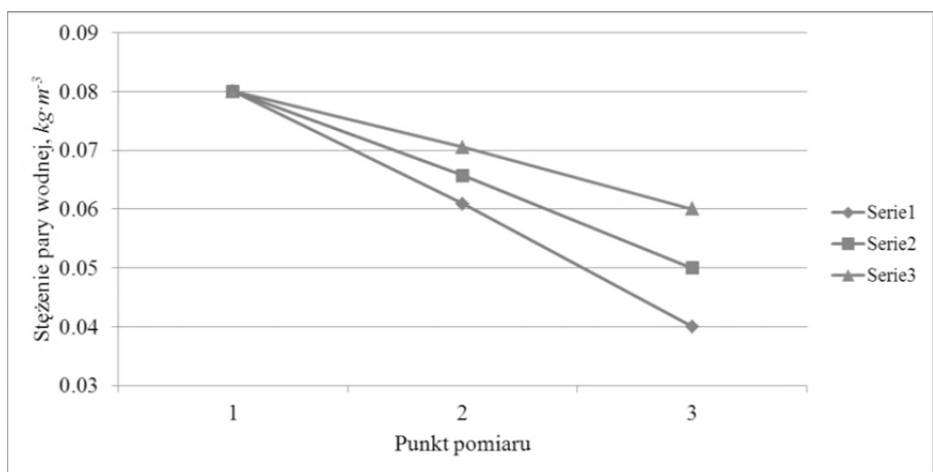


Rys. 178. Rozkład temperatur dla materiału 23 (dzianina bawełniana dwuwarstwowa – nitka łącząca poliamidowa BawBiel 20 tex BawBiel 15 tex /PA66 22/7)

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 111. Rozkład stężeń pary wodnej dla materiału 23 (dzianina bawełniana dwuwarstwowa – nitka łącząca poliamidowa BawBiel 20 tex BawBiel 15 tex/ PA66 22/7)

Numer serii	Stężenie pary wodnej w poszczególnych warstwach, $kg \cdot m^{-3}$		
	Nr 1 = 0	Nr 2 = 0,613	Nr 3 = 1,226
1	0,0800	0,0609	0,0400
2	0,0800	0,0657	0,0500
3	0,0800	0,0705	0,0600



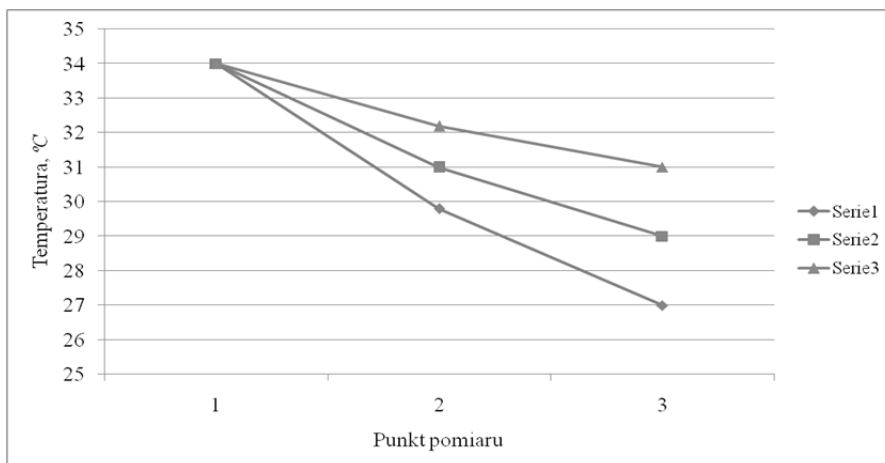
Rys. 179. Rozkład stężeń pary wodnej dla materiału 23 (dzianina bawełniana dwuwarstwowa – nitka łącząca poliamidowa BawBiel 20 tex BawBiel 15 tex/ PA66 22/7)

Źródło: opracowanie własne.

Zmienności temperatur są podobne dla obu warstw materiału, ponieważ rozkład oporów ciepła jest zbliżony dla obu tych materiałów. Podobna zależność zachodzi też dla stężeń pary wodnej, co wynika ze zbliżonych wartości oporów przenikania pary. Kąty nachylenia obu części w omawianych wykresach są zbliżone, niezależnie od rozpatrywanego parametru oraz warstwy materiału.

Tabela 112. Rozkład temperatur dla materiału 24 (dzianina bawełniana dwuwarstwowa – nitka łącząca poliamidowa W3 W1/PA66 22/7)

Numer serii	Temperatura materiału w poszczególnych warstwach, °C		
	Nr 1 = 0	Nr 2 = 0,6565	Nr 3 = 1,313
1	34,00	29,79	27,00
2	34,00	30,99	29,00
3	34,00	32,19	31,00

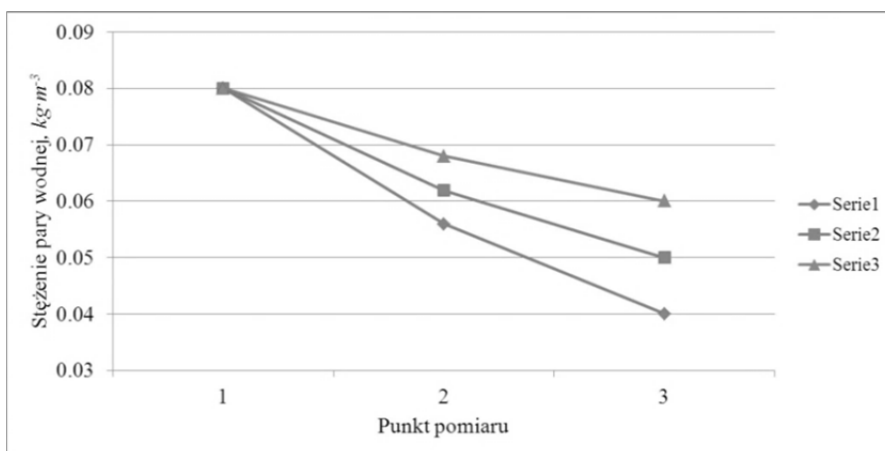


Rys. 180. Rozkład temperatur dla materiału 24 (dzianina bawełniana dwuwarstwowa – nitka łącząca poliamidowa W3 W1/PA66 22/7)

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 113. Rozkład stężeń pary wodnej dla materiału 24 (dzianina bawełniana dwuwarstwowa – nitka łącząca poliamidowa W3 W1/PA66 22/7)

Numer serii	Stężenie pary wodnej w poszczególnych warstwach, $kg \cdot m^{-3}$		
	Nr 1 = 0	Nr 2 = 0,6565	Nr 3 = 1,313
1	0,0800	0,0559	0,0400
2	0,0800	0,0619	0,0500
3	0,0800	0,0680	0,0600



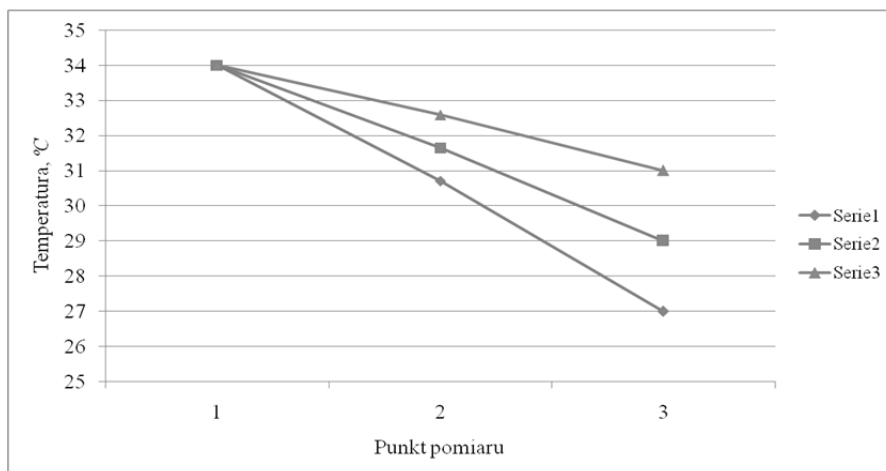
Rys. 181. Rozkład stężeń pary wodnej dla materiału 24 (dzianina bawełniana dwuwarstwowa – nitka łącząca poliamidowa W3 W1/PA66 22/7)

Źródło: opracowanie własne.

W przypadku tego materiału występują podobne własności przewodzenia ciepła i pary wodnej w obu warstwach. Warstwa wewnętrzna, bliższa skóry wcześniej, charakteryzuje się większym oporem ciepła i większym oporem przewodzenia pary wodnej niż warstwa zewnętrzna, co powoduje większe spadki temperatur i stężeń pary wodnej w warstwie wewnętrznej, czyli większe kąty nachylenia do poziomu.

Tabela 114. Rozkład temperatur dla materiału 25 (dzianina bawełniana dwuwarstwowa – nitka łącząca poliamidowa W3 W2 /PA66 22/7)

Numer serii	Temperatura materiału w poszczególnych warstwach, °C		
	Nr 1 = 0	Nr 2 = 0,669	Nr 3 = 1,338
1	34,00	30,71	27,00
2	34,00	31,65	29,00
3	34,00	32,59	31,00

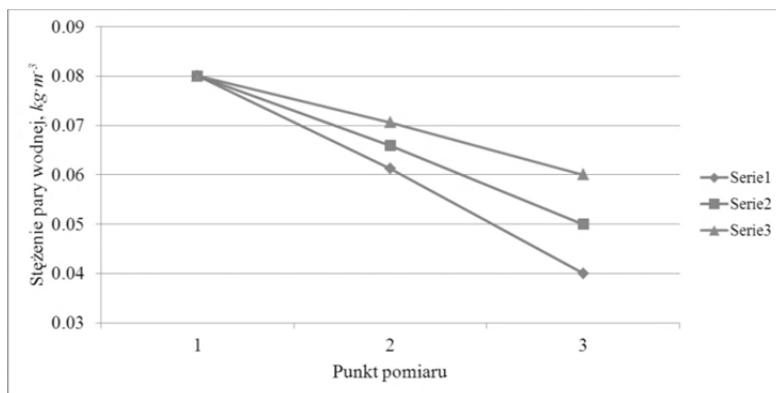


Rys. 182. Rozkład temperatur dla materiału 25 (dzianina bawełniana dwuwarstwowa – nitka łącząca poliamidowa W3 W2 /PA66 22/7)

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 115. Rozkład stężeń pary wodnej dla materiału 25 (dzianina bawełniana dwuwarstwowa – nitka łącząca poliamidowa W3 W2 /PA66 22/7)

Numer serii	Stężenie pary wodnej w poszczególnych warstwach, $kg \cdot m^{-3}$		
	Nr 1 = 0	Nr 2 = 0,669	Nr 3 = 1,338
1	0,0800	0,0612	0,0400
2	0,0800	0,0659	0,0500
3	0,0800	0,0706	0,0600



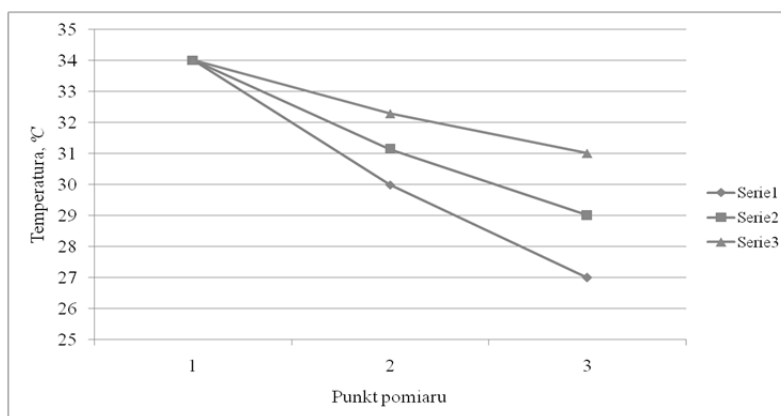
Rys. 183. Rozkład stężeń pary wodnej dla materiału 25 (dzianina bawełniana dwuwarstwowa – nitka łącząca poliamidowa W3 W2 /PA66 22/7)

Źródło: opracowanie własne.

Zmienności temperatur są podobne w obu warstwach materiału, bo opory ciepła są zbliżone dla obu tych materiałów. Dlatego wykresy temperatury są zbliżone do linii prostej, o bardzo nieznacznie różnym kącie nachylenia do poziomu. To samo odnosi się także do stężeń pary wodnej, ponieważ opory pary wodnej są również zbliżone dla obu materiałów. Kąty nachylenia obu części wykresów są zbliżone.

Tabela 116. Rozkład temperatur dla materiału 26 (dzianina bawełniana dwuwarstwowa – nitka łącząca poliamidowa W3 W3 /PA66 22/7)

Numer serii	Temperatura materiału w poszczególnych warstwach, °C		
	Nr 1 = 0	Nr 2 = 0,6225	Nr 3 = 1,245
1	34,00	29,98	27,00
2	34,00	31,13	29,00
3	34,00	32,28	31,00

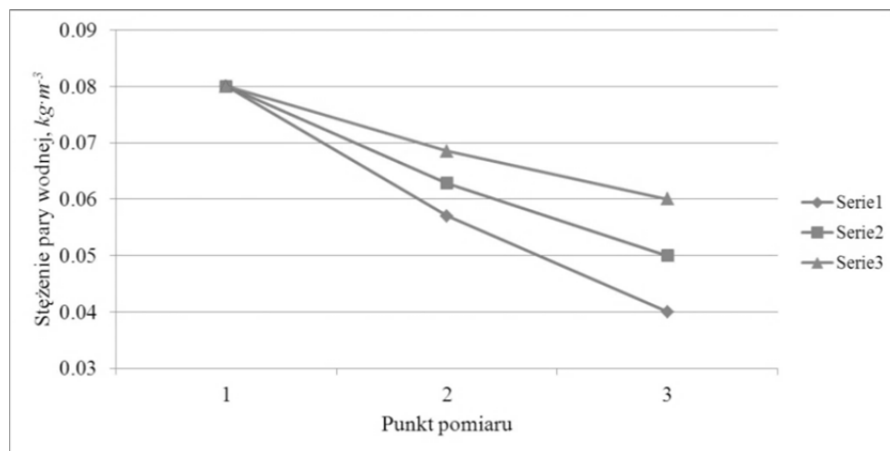


Rys. 184. Rozkład temperatur dla materiału 26 (dzianina bawełniana dwuwarstwowa – nitka łącząca poliamidowa W3 W3 /PA66 22/7)

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 117. Rozkład stężeń pary wodnej dla materiału 26 (dzianina bawełniana dwuwarstwowa – nitka łącząca poliamidowa W3 W3 /PA66 22/7)

Numer serii	Stężenie pary wodnej w poszczególnych warstwach, $kg \cdot m^{-3}$		
	Nr 1 = 0	Nr 2 = 0,6225	Nr 3 = 1,245
1	0,0800	0,0570	0,0400
2	0,0800	0,0628	0,0500
3	0,0800	0,0685	0,0600



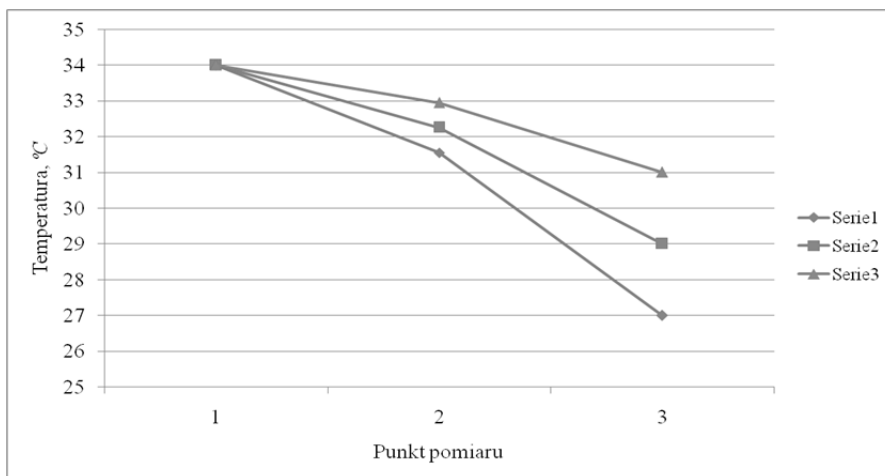
Rys. 185. Rozkład stężeń pary wodnej dla materiału 26 (dzianina bawełniana dwuwarstwowa – nitka łącząca poliamidowa W3 W3 /PA66 22/7)

Źródło: opracowanie własne.

Podobnie jak dla poprzedniego przypadku, własności przewodzenia ciepła (opór cieplny) i pary wodnej (opór przenikania pary wodnej) są podobne w obu warstwach materiału. Niezależnie od rozpatrywanego parametru i serii badań kąty nachylenia obu części w omawianych wykresach są zbliżone.

Tabela 118. Rozkład temperatur dla materiału 27 (dzianina bawełniana dwuwarstwowa – nitka łącząca poliamidowa W2 W2 /PA66 22/7)

Numer serii	Temperatura materiału w poszczególnych warstwach, °C		
	Nr 1 = 0	Nr 2 = 0,6175	Nr 3 = 1,235
1	34,00	31,55	27,00
2	34,00	32,25	29,00
3	34,00	32,95	31,00

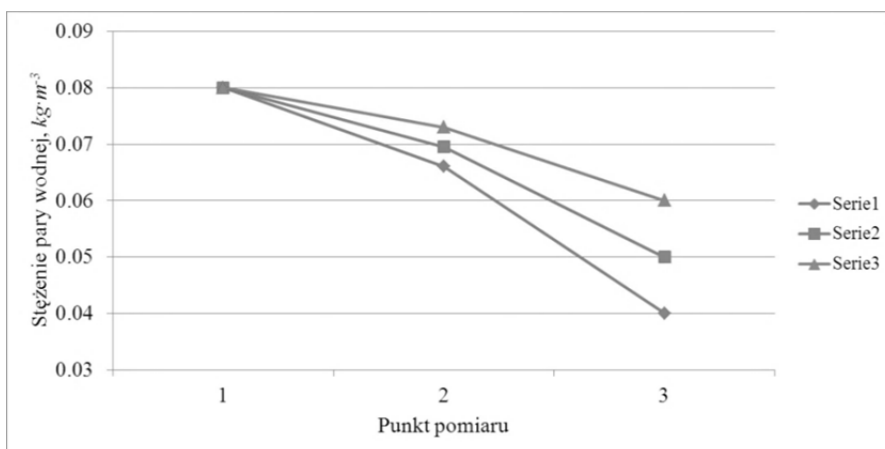


Rys. 186. Rozkład temperatur dla materiału 27 (dzianina bawełniana dwuwarstwowa – nitka łącząca poliamidowa W2 W2 /PA66 22/7)

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 119. Rozkład stężeń pary wodnej dla materiału 27 (dzianina bawełniana dwuwarstwowa – nitka łącząca poliamidowa W2 W2 /PA66 22/7)

Numer serii	Stężenie pary wodnej w poszczególnych warstwach, $kg \cdot m^{-3}$		
	Nr 1 = 0	Nr 2 = 0,6175	Nr 3 = 1,235
1	0,0800	0,0660	0,0400
2	0,0800	0,0695	0,0500
3	0,0800	0,0730	0,0600



Rys. 187. Rozkład stężeń pary wodnej dla materiału 27 (dzianina bawełniana dwuwarstwowa – nitka łącząca poliamidowa W2 W2 /PA66 22/7)

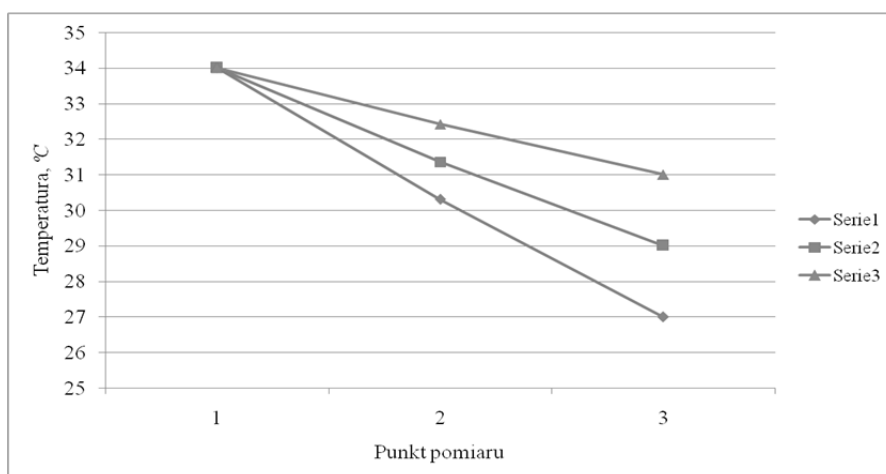
Źródło: opracowanie własne.



Materiał ten charakteryzuje się warstwą zewnętrzną o większych oporach ciepła i przenikania pary wodnej od warstwy wewnętrznej. Spadki temperatur i stężeń pary wodnej są większe dla warstwy zewnętrznej, czyli wykresy obu zmiennych stanu są w tej warstwie bardziej nachylone do poziomu. Świadczy to, że warstwa zewnętrzna tego materiału jest lepszym izolatorem ciepła oraz lepszym izolatorem pary wodnej.

Tabela 120. Rozkład temperatur dla materiału 28 (dzianina bawełniana dwuwarstwowa – nitka łącząca poliamidowa W1 W1/PA66 22/7)

Numer serii	Temperatura materiału w poszczególnych warstwach, °C		
	Nr 1 = 0	Nr 2 = 0,6005	Nr 3 = 1,201
1	34,00	30,30	27,00
2	34,00	31,36	29,00
3	34,00	32,42	31,00

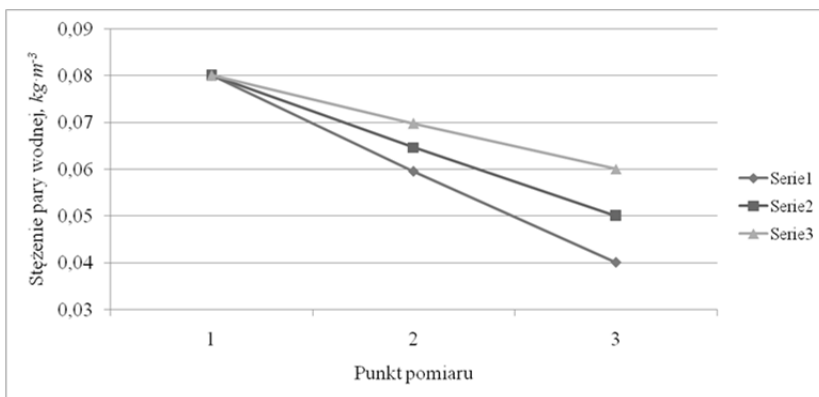


Rys. 188. Rozkład temperatur dla materiału 28 (dzianina bawełniana dwuwarstwowa – nitka łącząca poliamidowa W1 W1/PA66 22/7)

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 121. Rozkład stężeń pary wodnej dla materiału 28 (dzianina bawełniana dwuwarstwowa – nitka łącząca poliamidowa W1 W1/PA66 22/7)

Numer serii	Stężenie pary wodnej w poszczególnych warstwach, $kg \cdot m^{-3}$		
	Nr 1 = 0	Nr 2 = 0,6005	Nr 3 = 1,201
1	0,0800	0,0595	0,0400
2	0,0800	0,0646	0,0500
3	0,0800	0,0697	0,0600



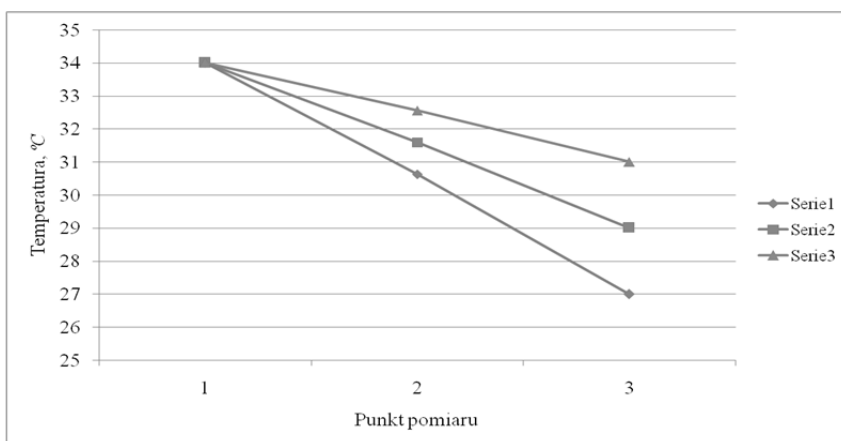
Rys. 189. Rozkład stężeń pary wodnej dla materiału 28 (dzianina bawełniana dwuwarstwowa – nitka łącząca poliamidowa W1 W1/PA66 22/7)

Źródło: opracowanie własne.

Obie warstwy materiału mają podobne własności przewodzenia ciepła, to samo dotyczy też transportu pary wodnej (masy). Tak więc obie części odpowiednich wykresów są nachylone pod tym samym kątem do poziomu.

Tabela 122. Rozkład temperatur dla materiału 29 (dzianina bawełna dwustronna – nitka łącząca poliamidowa Baw 24 tex Baw 24 tex/PA66 22/7)

Numer serii	Temperatura materiału w poszczególnych warstwach, °C		
	Nr 1 = 0	Nr 2 = 0,6565	Nr 3 = 1,313
1	34,00	30,63	27,00
2	34,00	31,59	29,00
3	34,00	32,56	31,00

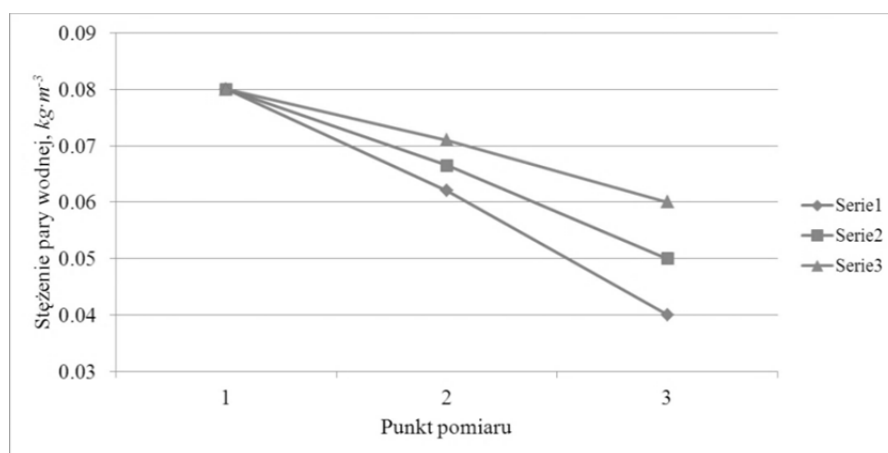


Rys. 190. Rozkład temperatur dla materiału 29 (dzianina bawełna dwustronna – nitka łącząca poliamidowa Baw 24 tex Baw 24 tex/PA66 22/7)

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 123. Rozkład stężeń pary wodnej dla materiału 29 (dzianina bawełna dwustronna – nitka łącząca poliamidowa Baw 24 tex Baw 24 tex/PA66 22/7)

Numer serii	Stężenie pary wodnej w poszczególnych warstwach, $kg \cdot m^{-3}$		
	Nr 1 = 0	Nr 2 = 0,6565	Nr 3 = 1,313
1	0,0800	0,0595	0,0400
2	0,0800	0,0646	0,0500
3	0,0800	0,0698	0,0600



Rys. 191. Rozkład stężeń pary wodnej dla materiału 29 (dzianina bawełna dwustronna – nitka łącząca poliamidowa Baw 24 tex Baw 24 tex/PA66 22/7)

Źródło: opracowanie własne.

Podobnie jak dla poprzedniego materiału zmienności temperatur i stężeń pary wodnej są podobne, rozkład oporów ciepła i pary wodnej jest zbliżony dla obu warstw.

#### 2.9.4. Wnioski wynikające z symulacji sprzężonego transportu ciepła i masy przez dzianiny

Wprowadzony model zawiera szereg uproszczeń, co jest typowym problemem odpowiedniej reprezentatywności modelu w stosunku do zjawiska rzeczywistego. Częściowo wynikają one z konieczności ich wprowadzenia, czyli dostosowania stosunkowo skomplikowanej postaci ogólnej zagadnienia do prostszej, możliwej do rozwiązania, ale jednocześnie reprezentatywnej dla transportu ciepła i pary wodnej (masy). Dlatego w pracy zostało założone ustalone przewodzenie ciepła i wilgoci, czyli niezależne od czasu. Powoduje to znaczne uproszczenie rozwiązywanych równań, z jednoczesnym rozprężeniem układu równań. Dla stanu nieustalonego ciepło i para wodna są transportowane w sposób sprzężony, tj. część ciepła jest transportowana z wilgocią (masą). Natomiast w stanie ustalono-

nym ciepło i masa (wilgoć) według tych uproszczeń są przekazywane w sposób niezależny, brak powyższego transportu sprzężonego, chociaż nie dla wszystkich materiałów jest to założenie prawdziwe. Częściowo zostało to jednak potwierdzone uzyskanymi wynikami symulacji, co będzie omówione w dalszej części wniosków. Ponadto założone zostały stałe wartości danych materiałowych, niezależne od czasu i przyjętych zmiennych stanu. Nie zawsze jest to zgodne ze stanem faktycznym, ponieważ część materiałów zmienia swoje własności przewodzenia ciepła i masy pod wpływem ciepła i wilgoci (pary wodnej). Jednak w badanych próbkach nie występują znaczne wartości temperatur i stężeń pary wodnej, tak więc spowodowane tym ewentualne błędy modelowania nie są duże. Uproszczenia mogą być również konsekwencją braku dokładnych danych dotyczących materiału. Dotyczy to głównie hipotetycznego przyjęcia podziału materiałów w połowie grubości, tj. płaszczyzna podziału (brzeg wewnętrzny, czyli interfejs) jest w połowie sumarycznej szerokości materiału dwuwarstwowego. Nie zostały dopuszczone mieszane własności materiałów spowodowane np. migracjami włókien, obróbką cieplną lub chemiczną itp., każda z warstw ma inne własności. Jedna z warstw ma opory ciepła i pary wodnej, określone dla jednej ze stron materiału, druga – dla drugiej strony. Wartości temperatury i stężeń pary wodnej zostały przyjęte arbitralnie, jednak z uwzględnieniem najczęściej spotykanych zakresów tych zmiennych stanu spotykanych w przypadku dzieci przedwcześnie urodzonych. Dodatkowo przyjęte wartości nie są ekstremalne, aby nie wpływały znacząco na parametry materiałowe. Uzyskane przebiegi zmiennych stanu (temperatur i stężeń pary wodnej) są liniowe, zgodnie z ogólnie znaną i przyjętą tutaj teorią przenikania ciepła i masy przez przegrodę płaską. Przebiegi te wynikają bezpośrednio z przyjętych wartości temperatur i stężeń pary wodnej na brzegach materiału (przegrody) oraz oporów ciepła i pary wodnej.

Dla symulacji wykonanych dla 29 materiałów uzyskano wszystkie przypadki zmienności. W znacznej części przebiegi obu zmiennych stanu (czyli temperatury i stężenia pary wodnej) mają taki sam charakter w obu warstwach materiału (17 z 29 symulacji, czyli 58,6% przypadków). Z tego dla 12 przypadków (czyli 41,4% całości) są porównywalne opory ciepła i pary wodnej w obu warstwach. Daje to przebiegi zmiennych stanu o takim samym, stałym, kącie nachylenia do poziomu w obu częściach materiału (na całej jego szerokości). W 3 przypadkach (czyli 10,3% całości) warstwa wewnętrzna ma jednocześnie większe opory przewodzenia ciepła i pary wodnej, zaś warstwa zewnętrzna, bardziej oddalona od skóry – mniejsze. Tak więc większemu oporowi ciepła odpowiada dla tego samego materiału większy opór przewodzenia pary wodnej. Najbardziej ciekawy i jednocześnie charakterystyczny jest w tym przypadku materiał nr 7. Praktycznie cały opór ciepła całości materiału występuje tylko w warstwie wewnętrznej, materiał zewnętrzny transportuje ciepło praktycznie bez żadnego oporu. Przebiegi zmienności pary wodnej nie są aż tak zróżnicowane, choć ogólnie został zachowany ten sam charakter zmienności. W pozostałych 2 przypadkach materiałów (czyli 6,9% całości) jest sytuacja odwrotna, w warstwie

wewnętrznej są jednocześnie mniejsze opory ciepła i pary wodnej, w warstwie zewnętrznej – większe. W pozostałych 12 przypadkach (czyli 41,4% całości) występuje niezgodność własności w obu warstwach tego samego materiału. Największa liczba przypadków (5 z 29, czyli 17,2% przebadanych materiałów) ma większy opór cieplny warstwy wewnętrznej, mniejszy zewnętrznej i stały opór pary wodnej na całej szerokości materiału. Znaczący to, że zmiana oporu ciepła nie pokrywa się ze zmianą oporu pary wodnej dla tego samego materiału. Symetryczny przypadek zachodzi dla 3 przebadanych materiałów (czyli 10,3% całości). Stały jest opór ciepła na całej szerokości materiału, zaś opór pary wodnej większy w warstwie wewnętrznej (bliżej ciała wczesniaka). W jednym przypadku (3,4% całości) stałemu oporowi pary wodnej towarzyszy zmienny opór ciepła – mniejszy w warstwie wewnętrznej, większy w warstwie zewnętrznej. W pozostałych 3 przypadkach (10,3% całości) zachodzi inwersja własności materiałowych. W warstwie wewnętrznej jest większy opór przewodzenia ciepła, ale mniejszy opór przewodzenia pary wodnej. W warstwie zewnętrznej jest sytuacja odwrotna – mniejszy opór ciepła, większy pary wodnej.

Wynika stąd generalny wniosek, że mimo znacznych uproszczeń zostały otrzymane wyniki, które są w znacznym stopniu reprezentatywne dla przebadanych materiałów i mogą stanowić ciekawy element ich charakterystyki przewodzenia ciepła i masy. Zastosowanie niustalonego sprzężonego problemu przewodzenia ciepła i pary wodnej mogłoby stanowić pewne rozwinięcie problemu. Jednak trudności w opisie układu, sformułowaniu równań różniczkowych transportu, rozwiązaniu ich oraz odpowiedniej interpretacji wyników mogłyby okazać się niewspółmiernie wielkie w stosunku do nakładu pracy i czasu maszynowego poświęconego na rozwiązanie problemu. Przypadek ustalonego przewodzenia ciepła jest znacznie prostszy, a jednocześnie wystarczająco reprezentatywny dla określenia charakteru tych zjawisk transportu. Ponadto uzyskane przebiegi pomagają określić dokładne zachowanie materiału dwuwarstwowego poddanego transportowi ciepła i masy. Można bliżej określić, która jego część ma własności izolacyjne w transporcie ciepła, jak i własności izolacyjne w transporcie pary wodnej. Dodatkowe uproszczenie stanowi tutaj symetryczny podział grubości materiału, co pozwala na porównanie charakteru zmian w obu częściach wyrobu warstwowego. Uzyskane wiadomości mogą stanowić wskazówkę dotyczącą projektowania optymalnego materiału na ubiór noworodka. Tak więc zastosowanie symulacji numerycznych może pomóc w optymalizacji cech, wymiarów i własności materiałowych ubioru noworodków. Ich zastosowanie może zatem przynieść określone korzyści techniczne oraz ekonomiczne, ponieważ zastosowanie symulacji numerycznych jest zawsze tańsze od intuicyjnego działania projektanta lub technika.

## Literatura

- [1] Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Socjalnej z dnia 26.09.1997 wraz z późniejszymi zmianami Dz.U. z 2011 nr 173 poz. 1034, 1997.
- [2] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 2005 r.
- [3] Directive 89/686/EEC – personal protective equipment of 21 December 1989 on the approximation of the laws of the Member States relating to personal protective equipment.
- [4] Dyrektywa Rady Wspólnot Europejskich nr 89/686/EEC z dnia 21.12.1989.
- [5] **Szmelter W.:** Metrologia włókiennicza, tom IV. PWN, Warszawa 1977.
- [6] **Wykowska M.:** Ergonomia – wydanie internetowe. Wyd. AGH, Kraków, 1994, dostęp: [http://www.ergonomia.agh.edu.pl/Skrypt\\_Ergonomia-M.Wykowska/ergonomia/nr\\_2.htm](http://www.ergonomia.agh.edu.pl/Skrypt_Ergonomia-M.Wykowska/ergonomia/nr_2.htm)
- [7] **Pilawski A.:** Podstawy Biofizyki. Wyd. PZWL, Warszawa, 1985.
- [8] PN-EN ISO 9920, Ergonomia środowiska termicznego – Szacowanie izolacyjności cieplnej i oporu pary wodnej zestawów odzieżowych, listopad 2009.
- [9] PN-EN 8996, Ergonomia środowiska termicznego – Określenie temperatury metabolizmu, maj 2005.
- [10] **Agourram B., Bach V., Tourneux P., Krim G., Delnaud S., Libert J.P.:** Why wrapping premature neonates to prevent hypothermia can predispose to overheating. *Journal of Applied Physiology*, Vol. 108, 2010, s. 1674-1681.
- [11] PN-EN ISO 7933, Ergonomia środowiska termicznego – Analityczne wyznaczenie i interpretacja stresu cieplnego z wykorzystaniem obliczeń przewidywanego obciążenia termicznego, maj 2005.
- [12] ISO 7243 Hot environments – Estimation of the heat stress on working man, based on the WBGT – index (wet bulb globe temperature), 1984.
- [13] ISO 7726 Ergonomics of the thermal environment – Instruments for measuring physical quantities, 2002.
- [14] <http://hypertextbook.com/facts/2001/IgorFridman.shtml>
- [15] **Mosteller R.D.:** Simplified calculation of body-surface area. *The New England Journal of Medicine*, Vol. 317, 1987, s. 1098.
- [16] **Haycock G.B., Schwartz G.J., Wisotsky D.H.:** Geometric method for measuring body surface area: A height-weight formula validated in infants, children and adults. *Journal of Pediatrics*, Vol. 93, 1978, s. 62-66.
- [17] **Gehan E.A., George S.L.:** Estimation of human body surface area from height and weight. *Cancer Chemother Reports*, Vol. 54, 1970, s. 225-235.
- [18] **Boyd E.:** The growth of the surface area of the human body. Minneapolis: university of Minnesota Press, 1935.
- [19] **DuBois D., DuBois D.F.:** A formula to estimate the approximate surface area if height and weight be known. *Archives of Internal Medicine*, Vol. 17, 1916, s. 863-871.
- [20] **Malchaire J., Piette A., Kampmann B., Mehnert P., Gebhardt H., Havenith G., den Hartog E., Holmer I., Parsons K., Alfano G., Griefahn B.:** Development and validation of the predicted heat strain model. *The Annals of Occupational Hygiene*, Vol. 45, No. 2, 2001, s. 123-135.
- [21] **Malchaire J., Kampmann B., Mehnert P., Gebhardt H., Piette A., Havenith G., Holmer I., Parsons K., Alfano G., Griefahn B.:** Assessment of the risk of heat disorders encountered during work in hot conditions. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, Vol. 75, 2002, s. 153-162.

- [22] **Malchaire J.:** Occupational heat stress assessment by the predicted Heat Strain Model *Industrial Health*, Vol. 44, 2006, s. 380-387.
- [23] **Mehnert P., Malchaire J., Kampmann B., Piette A., Griefahn B., Gebhardt H.J.:** Prediction of the average skin temperature in warm and hot environments. *European Journal of Applied Physiology*, Vol. 82, 2000, s. 52-60.
- [24] **Parsons K.C., Havenith G., Holmer I., Nilsson H., Malchaire J.:** The effects of wind and human movement on the heat and vapour transfer properties of clothing. *The Annals of Occupational Hygiene*, Vol. 43, No. 5, 1999, s. 367-376.
- [25] **Bendkowska W.:** Tekstylna Shingosen. *Przegląd Włókienniczy + Techniki Włókienniczy*, No. 2, 1999, s. 5-8.
- [26] **Kim J.H., Powell J.B., Roberge R.J., Shepherd A., Coca A.:** Evaluation of protective ensemble thermal characteristics through sweating hot plate, sweating thermal manikin, and human tests, *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, Vol. 11, No. 4, 2014, s. 259-267.
- [27] **Bartkowiak G., Marszałek A.:** Dwustopniowy model badania właściwości biofizycznych odzieży ochronnej, *Przegląd Włókienniczy + Techniki Włókienniczy*, No. 3, 1999, s. 9-14.
- [28] **Hang W., Chen W., Long Ch.:** Wetness Comfort of fine-polypropylene-fibre fabrics, *Journal Textile Institute*, Vol. 90, No. 2, 1999, s. 252-263.
- [29] **Chen Q., Fan J., Sarkar M.:** Biomimetics of Plant Structure in Knitted Fabrics to Improve the Liquid Water Transport Properties, *Textile Research Journal*, Vol. 10, No. 3, 2009, s. 343-350.
- [30] **Krucinska I., Konecki W., Michalak M.:** Systemy pomiarowe we włókiennictwie, Wyd. Politechniki Łódzkiej, Łódź, 2006.
- [31] PN-EN ISO 11092:2014-11. Tekstylna – Właściwości fizjologiczne – Pomiar oporu cieplnego i oporu pary wodnej w warunkach stanu ustalonego (metoda pocącej się zaizolowanej cieplnie płyty), listopad 2014.
- [32] PN-EN ISO 15831 Odzież Właściwości fizjologiczne Pomiar izolacyjności cieplnej z zastosowaniem manekina termicznego, kwiecień 2006.
- [33] **Marszałek A.:** Zastosowanie manekinów termicznych do badania komfortu cieplnego człowieka, *Bezpieczeństwo Pracy*, No. 10, 2002, s. 26-29.
- [34] **Holmér I.:** Thermal manikin history and applications, *European Journal of Applied Physiology*, Vol., 92, No. 6, 2004, s. 614-618.
- [35] **Melikov A.:** Breathing thermal manikins for indoor environment assessment: important characteristics and requirements, *European Journal of Applied Physiology*, Vol., 92, No. 6, 2004, s. 710-713.
- [36] Vehicle Thermal Management, [http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/ancillary\\_loads/adam.html](http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/ancillary_loads/adam.html)
- [37] Fiala – Fe Maula (About the thermal manikin in THESEUS – FE), P+Z Engineering GmbH, Munich, 2009.
- [38] **Wang F.:** A Comparative Introduction on Sweating Thermal Manikin “Newton” and “Walter”. 7th International Thermal Manikin and Modelling Meeting – University of Coimbra, September 2008.
- [39] Key Features of the THESEUS-FE® Thermal Solver, <http://www.theseus-fe.com/>
- [40] Measurement Technology Northwest, Thermal Measurement Systems, <http://thermal.mtnw-usa.com/>
- [41] **Wang F.:** Physiological Model Controlled Sweating Thermal Manikin: Can it replace human subjects? *Journal of Ergonomics*, Vol. 103, 2011, s. 2-5.
- [42] Thermal Manikin Newton, Manual, 2010.

- [43] **Kuklane K., Sandsund M., Reinertsen RE., Tochiyara Y., Fukazawa T., Holme' r I.:** Comparison of thermal manikins of different body shapes and size. *European Journal of Applied Physiology*, Vol., 92, No. 6, 2004, s. 683-688.
- [44] **Havenith G., Nilsson H.:** Correction of clothing insulation for movement and wind effects, a meta-analysis. *European Journal of Applied Physiology*, Vol. 92, No. 6, 2004, s. 636-640.
- [45] **Havenith G., Nilsson H.:** DEN Hartog, E.A. and Parsons, K.C., Clothing Convective Heat Exchange-Proposal for improved Prediction in Standards and Models. *Annals of Occupational Hygiene*, Vol. 43, No. 5, 1999, s. 329-337.
- [46] **Havenith G., Holmer I., Parsons KC.:** Personal Factors in Thermal Comfort Assessment Clothing Properties and Metabolic Heat Production. *Energy and Buildings*, Vol. 34, 2002, s. 581-591.
- [47] **Havenith G., Nilsson, H.:** Correction of clothing insulation for movement and wing, a meta-analysis, *European Journal of Applied Physiology*, Vol. 93, No. 3, 2005, s. 506-510.
- [48] **Nilsson H., Holmer I.:** Prediction of motion effects from static manikin measurements *Proceedings and European seminar on Thermal Manikin Testing*, Solana, 1997, s. 45-48.
- [49] **Havenith G., Holmer I., DEN Hartog E.A., Parsons K.C.:** Clothing Evaporative Heat Resistance-Proposals for Improved Representation in Standards and Models. *Annals of Occupational Hygiene*, Vol. 43, No. 5, 1999, s. 339-346.
- [50] PN-EN ISO 11612:2015-11, *Odzież ochronna – Odzież do ochrony przed czynnikami gorącymi i płomieniem – Minimalne wymagania eksploatacyjne*, listopad, 2015.
- [51] PN-EN 343:2008, *Odzież ochronna – Ochrona przed deszczem*, 2008.
- [52] PN-EN 342/AC:2008, *Odzież ochronna – Zestawy odzieży i wyroby odzieżowe chroniące przed zimnem*, 2008.
- [53] **Żurek W., Kopias K.:** *Struktura płaskich wyrobów włókienniczych*, WNT, Warszawa, 1983.
- [54] *SolidWorks Flow Simulation – Technical Reference*, 2014.
- [55] **Kobza W.:** *Modelowanie zginania tekstylnych wyrobów kompozytowych*, PAN oddz. Łódź, Komisja Włókiennictwa, Łódź, 2000.
- [56] **Kopias K.:** *Budowa i technologia dzianin kolumienkowych*. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Podręczniki akademicki, 2010.
- [57] **Korycki R.:** *Identyfikacja i optymalne projektowanie kształtu wyrobów i konstrukcji włókienniczych przewodzących ciepło*, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, *Rozprawy Naukowe*, 2003.
- [58] **Korycki R.:** *Optymalizacja warunków sprzężonego przewodzenia ciepła i masy w wyrobach włókienniczych*. Monografie Politechniki Łódzkiej, Łódź, 2012.
- [59] **Li Y.:** *The science of clothing comfort*, *Textile Progress*, Vol. 15, No. 1, 2, 2001, s. 23-27.
- [60] **Golański D., Terada K., Kikuchi N.:** Macro and micro scale modeling of thermal residual stresses in metal matrix composite surface layers by homogenization method, *Computational Mechanics*, Vol. 19, 1997, s. 188-202.
- [61] **Tomeczek J.:** *Termodynamika*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 1999.
- [62] **Kamiński M.:** *Analiza wrażliwości efektywnych własności termomechanicznych periodycznych kompozytów wieloskładnikowych z defektami*. *Kompozyty*, Vol. 5, No. 4, 2005, s. 41-47.



- [63] **Zarzycki R.:** Wymiana ciepła i ruch masy w inżynierii środowiska. WNT, Warszawa, 2010.
- [64] **Kącki E.:** Równania różniczkowe cząstkowe w zagadnieniach fizyki i techniki. WNT, Warszawa, 1992.
- [65] **Orzechowski Z., Prywer J., Zarzycki R.:** Mechanika płynów w inżynierii środowiska. WNT, Warszawa, 2001.
- [66] **David HG., Nordon P.:** Case studies of coupled heat and moisture diffusion in wool beds. Textile Research Journal, Vol. 39, 1969, s. 166-172.
- [67] **Li Y., Luo Z.:** An improved mathematical simulation of the coupled diffusion of moisture and heat in wool fabric. Textile Research Journal, Vol. 69, No.10, 1999, s. 760-768.
- [68] **Li Y., Holcombe BV.:** A two-stage sorption model of the coupled diffusion of moisture and heat in wool fabrics. Textile Research Journal, Vol. 62, No. 4, 1992, s. 211-217.
- [69] **Haghi AK.:** Factors effecting water-vapor transport through fibers. Theoretical and Applied Mechanics Letters, Vol. 30, No. 4, 2003, s. 277-309.
- [70] **Crank J.:** Mathematics of diffusion, Oxford University Press, 1975.
- [71] Caring for tomorrow. EFCNI White Paper on Maternal and Newborn Health and Aftercare. Services: <http://www.efcni.org/index.php?id=1888>
- [72] Born too soon. The Global Action Report on Preterm Birth  
[http://www.who.int/pmnch/media/news/2012/preterm\\_birth\\_report/en/index.html](http://www.who.int/pmnch/media/news/2012/preterm_birth_report/en/index.html)
- [73] „Na ratunek najmłodszym”, Rzeczpospolita, 16.01.2012.
- [74] Rocznik demograficzny 2012-2014, Główny Urząd Statystyczny, stat.gov.pl
- [75] **Szczapa J., Jackowska T., Szenborn L., Wysocki J., Czajka H., Stryczyńska-Kazubska J., Lauterbach R., Chybicka A., Dobrzańska A., Helwich E.:** Vaccination of premature babies and newborns with low birth weight. Recommendations of Polish experts. *Pediatrics Polska*, Vol. 86, No. 5, 2011, s. 506-516.  
<http://www.standardypostepowania.pl/index.php?page=search&fields=neonatologia&nav=>
- [76] **Koziółek A.:** Wpływ sposobu znieczulenia noworodka z masą urodzeniową nie przekraczającą 1000 gramów do zabiegu laserowej fotokoagulacji siatkówki na wybrane parametry dobrostanu w okresie okołoperacyjnym. Rozprawa doktorska, Klinika Anestezjologii w Położnictwie i Ginekologii, Katedra Anestezjologii i Intensywnej Terapii Uniwersytetu Medycznego im. Karola Marcinkowskiego w Poznaniu, 2011.
- [77] Załącznik do Uchwały Nr 90/2007 Rady Ministrów z dnia 15 maja 2007 r. Narodowy Program Zdrowia na lata 2007-2015.
- [78] W 2015 r. umieralność niemowląt w Polsce będzie taka jak w UE, <http://www.rynekzdrowia.pl/Neonatologia/W-2015-r-umieralnosc-niemowlat-w-Polsce-bedzie-taka-jak-w-UE,128267,20.html>
- [79] W 2012 r. dalszy spadek umieralności niemowląt w Polsce, <http://www.roik.pl/w-2012-r-dalszy-spadek-umieralnosci-niemowlat-w-polsce/>
- [80] **Helder O.K., Mulder P., van Goudoever J.B.:** Computer-Generated Versus Nurse-Determined Strategy for Incubator Humidity and Time to Regain Birth-weight. *JOGNN*, Vol. 37, 2008, s. 255-261.
- [81] **Sherman T.I., Greenspan J.S., St Clair N., Touch S.M., Shaffer T.H.:** Optimizing the Neonatal Thermal Environment. *Neonatal Network*, Vol. 25, No. 4, 2006, s. 251-260.

- [83] **Górnicki B., Dębiec B., Baszczyński J.:** *Rozwój dziecka. Tom I. Pediatria.* Wydawnictwo Lekarskie PZWL, Warszawa 2002.
- [84] **Çinar N.D., Filiz T.M.:** Neonatal thermoregulation, *Journal of Neonatal Nursing*, Vol. 12, 2006, s. 69-74.
- [85] **Lund C., Kuller J., Lane A., et al.:** Neonatal skin care: the scientific basis for practice. *Journal of Obstetric, Gynecologic and Neonatal Nursing*, Vol. 28, 1999, s. 241-254.
- [86] **Agourram B., Bach V., Tourneux P., Krim G., Delanaud S., Libert J.P.:** Why wrapping premature neonates to prevent hypothermia can predispose to overheating. *Journal Applied Physiology*, Vol. 108, 2010, s. 1674-1681.
- [87] **Lyon A.:** Temperature control in the neonate. *Paediatrics and Child Health*, Vol. 18, No. 4, 2008, s. 155-160.
- [88] <http://gattino.pl/pl/content>
- [89] <http://www.prem2pram.co.uk/>
- [90] <http://www.healthychildren.org/English/ages-stages/baby/preemie/pages/Caring-For-A-Premature-Baby.aspx?nfstatus=401&nftoken=00000000-0000-0000-0000-000000000000&nfstatusdescription=ERROR%3a+No+local+token>
- [91] <http://www.babycentre.co.uk/a555455/what-your-premature-baby-needs>
- [92] <http://babycare.iloveindia.com/premature-baby-care/premature-baby-needs.html>
- [93] <http://babyworld.co.uk/2013/01/parafricta-baby-nests-for-a-premature-baby/>
- [94] <http://www.chuckleberries.ie/babies.asp>
- [95] <http://www.motherscare.com/>
- [96] **Howsden S.R.:** Infant Care Garment. Patent Amerykański US005621917.
- [97] **Ricci G., Patrizi A., Bendandi B., Menna G., Varotti E., Masi M.:** Therapeutics, Clinical effectiveness of a silk fabric in the treatment of atopic dermatitis. *British Journal of Dermatology*, Vol. 150, 2004, s. 127-131.
- [98] **Bergen M.E., Capjack L., McConnan L., Richards E.:** Design and evaluation of clothing for the neonate. *Clothing and Textiles Research Journal*, Vol. 14, No. 4, 1996, s. 225-233.
- [99] [www.oeko-tex.com](http://www.oeko-tex.com)
- [100] Rozporządzenie nr 1907/2006 (REACH) Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 18.12.2006 r., załącznik XVII.
- [101] <http://www.cpsc.gov/en/Regulations-Laws--Standards/CPSIA/The-Consumer-Product-Safety-Improvement-Act/>
- [102] Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 6 kwietnia 2004 r. Dz.U. nr 81, poz. 743 z późniejszymi zmianami.
- [103] Oeko-Tex® Standard 100 – Testing procedures (zał. 4).
- [104] Global Organic Textile Standard (GOTS), [http://www.ekonsument.pl/s170\\_global\\_organic\\_textile\\_standard\\_gots.html](http://www.ekonsument.pl/s170_global_organic_textile_standard_gots.html)
- [105] Rozporządzenie Rady (WE) nr 834/2007 z dnia 28 czerwca 2007 r. w sprawie produkcji ekologicznej i znakowania produktów ekologicznych, załącznik 5.
- [106] Rozporządzenie komisji (WE) nr 889/2008 z dnia 5 września 2008 r. ustanawiające szczegółowe zasady wdrażania rozporządzenia Rady (WE) nr 834/2007 w sprawie produkcji ekologicznej i znakowania produktów ekologicznych w odniesieniu do produkcji ekologicznej, znakowania i kontroli, załącznik 6.
- [107] Agriculture, Regulations of the department of agriculture, chapter—agricultural marketing service (standards, inspections, marketing practices), department of agriculture, part 205—national organic program, <http://www.ecfr.gov>
- [108] <http://www.iw.lodz.pl/certyfikacja/>

- [109] **Sedin G.:** Physics and physiology of human neonatal incubation. 2003 DOI:10.1016/B978-0-7216-9654-6.50060-6.
- [110] **Korycki R., Krucińska I.:** Global heat and mass transport in system: newborn baby skin – textile composite – surrounding, 8<sup>th</sup> International Conference Liberec, Czech Republic 2013.
- [111] **Nishi Y., Gage AP.:** Moisture permeation for clothing a factor governing thermal equilibrium and comfort, ASHRAE Trans, Vol. 75, 1970, s. 137-145.
- [112] **Umbach K.H.:** Hautnahe Synthetics mit gutem Tragekomfort. Chemiefasern-Textilindustrie, Vol. 8, 1980, s. 721-728.
- [113] **Umbach K.H.:** Tragekomfort mit zweiflächigen Textilien unter Verwendung von PP Fasern. Chemiefasern-Textilindustrie, Vol. 1, 1986, s. 64.
- [114] **Bühler M., Iyer Ch.:** Untersuchung und Weiterentwicklungsmöglichkeiten von funktionellen Maschenwaren auf Sportbekleidungssektor. Wirkerei und Strickerei Technik, No. 6, 1986, s. 611-615.
- [115] **Pillar B.:** Integrierte Maschenwaren mit einem höheren Feuchtetransport. Wirkerei und Strickerei Technik, Vol. 7, 1987, s. 721-728.
- [116] **Szucht E.:** Światowe kierunki rozwoju dzianin o wysokim komforcie fizjologicznym. Technik Włókienniczy, No. 3, 1990, s. 85-88.
- [117] **Umbach KH.:** Bekleidungsphysiologische Gesichtspunkte zur Entwicklung von Sportkleidung. Wirkerei und Strickerei Technik, No. 3, 1993, s. 108-114.
- [118] **Kowalski K., Wykin-Orlikowska G., Manduk-Chuchła T.:** Właściwości biofizyczne dzianin w badaniach laboratoryjnych i teście użytkowym. Przegląd Włókienniczy, No. 3, 2003, s. 6-9.
- [119] **Wilbik-Halgas B., Danych R., Więcek B., Kowalski K.:** Air and Water Vapour Permeability in double-Layered Knitted Fabrics with Different Raw Materials. Fibres & Textiles in Eastern Europe, Vol. 14, No. 3, 2006, s. 77- 81.
- [120] **Kowalski K., Janicka J., Massalska-Lipińska T., Nyka M.:** Impact of Raw Material combinations on the Biophysical Parameters and Underwear Microclimate of Two-Layer Knitted Materials. Fibres & Textiles in Eastern Europe, Vol. 18, No. 5, 2010, s. 64-70.
- [121] **Kawabata S.:** The standardization and analysis of hand evaluation, Osaka Tiger Printing Co. Japan, July 1980.
- [122] Kawabata Evaluation System-Operation manual, 1<sup>st</sup> edition KATO TECH CE.LTD, 2008.
- [123] **Park KY.:** Physical and hand properties of knitted fabrics from machine knitting fancy yarns. Journal of the Korea Fashion, Vol. 10, No. 2, 2008, s. 125-138.
- [124] SORB 3 manual – Instytut Włókiennictwa, Łódź 2009.
- [125] **Krucińska I. et al.:** Biodegradowalne wyroby włókniste, nr projektu POIG 01.03.01-00-007/08, Monografia Politechniki Łódzkiej, Łódź, 2014.
- [126] PN-EN 13726-2:2005 Metody badania bezpośrednich opatrunków ran – Część 2: Transmisja pary wilgoci przez opatrunki z folią półprzepuszczalną, 2005.
- [127] PN-EN ISO 9237:1998 Tekstylija – Wyznaczanie przepuszczalności powietrza wyrobów włókienniczych, 1998.
- [128] **Matusiak M.:** Ciepłochronność tkanin odzieżowych. Monografia Politechniki Łódzkiej, Łódź 2012.
- [129] **Holland E.J., Wilson C.A., Laing R.M., Niven B.E.:** Microclimate ventilation of infant bedding. International Journal of Clothing Science and Technology, Vol. 11, No. 4, 1999, s. 226-239.

- [130] **Wilson C.A., Laing R.M., Tamura T.:** Intrinsic “dry” thermal resistance of dry infant bedding during use: Part 2: estimated vs measured. *International Journal of Clothing Science and Technology*, Vol. 16, No. 3, 2004, s. 310-323.
- [131] **Wilbik-Halgas B., Danych R., Więcek B., Kowalski K.:** Air and Water Vapour Permeability in double-Layered Knitted Fabrics with Different Raw Materials. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, Vol. 14, No. 3, 2006, s. 77- 81.
- [132] **Elabbassi E.B., Belghazi K., Delanaud S., Libert J.P.:** Dry heat loss in incubator: comparison of two premature newborn sized manikins. *European Journal of Applied Physiology*, Vol. 92, No. 6, 2004, s. 679-682.
- [133] **Ostrowski Z., Rojczyk M., Łaszczuk J., Szczygiel I., Kaczmarczyk J., Nowak A.J.:** Infant care bed natural convection heat transfer coefficient – measurements and estimation. *Przegląd Elektrotechniczny*, Vol. 90, No. 5, 2014, s. 122-125.
- [134] **Bolin D., Holmer I., Sarman I., Tunell R.:** The use of an “infant thermal manikin” for the assessment of different neonatal heating equipments for premature newborn babies. *Physiological Models, IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 11th Annual International Conference*, 1989, s. 0252-0253.
- [135] **Li Y., Zhu Q.:** Simultaneous heat and moisture transfer with moisture sorption, condensation and capillary liquid diffusion in porous textiles, *Textile Research Journal*, Vol. 73, No. 6, 2003, s. 515-524.
- [136] **Li Y. Zhu Q., Yeung K.W.:** Influence of thickness and porosity on coupled heat and liquid moisture transfer in porous textiles. *Textile Research Journal*, Vol. 72, No. 5, 2002, s. 435-446.
- [137] **Korycki R.:** Sensitivity oriented shape optimization of textile composites during coupled heat and mass transport. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, 2010, s. 2385-2392.
- [138] **Korycki R.:** Shape optimization in oppositely directed coupled diffusion within composite structures. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 39, 2009, s. 283-296.
- [139] **Kostowski E.:** Heat transfer (in Polish), Technical University of Silesia, Gliwice, 1995.



Wydział Technologii Materiałowych i Wzornictwa Tekstyliów



Katedra Materiałoznawstwa, Towaroznawstwa i Metrologii Włókienniczej

ISBN 978-83-7283-808-7