

**ANNA WIĘZOWSKA**

**Wydział Technologii Materiałowych  
i Wzornictwa Tekstyliów Politechniki Łódzkiej  
Katedra Mechaniki i Informatyki Technicznej**

## **MODELOWANIE PROCESÓW WYMIANY CIEPŁA W DZIANINACH FUTERKOWYCH**

Promotor: **prof. dr hab. inż. Ryszard Korycki**

Recenzenci: **prof. dr hab. inż. Ryszard Kutylowski**  
**dr hab. inż. Małgorzata Matusiak**

*Ciepłochronność jest podstawowym parametrem determinującym praktyczne zastosowanie dzianin futerkowych. Analiza wymiany ciepła oraz metodyka określenia podstawowych parametrów struktury do optymalizacji konstrukcji z uwagi na wymagany poziom izolacyjności cieplnej nie zostały jeszcze dotychczas opisane dla dzianin futerkowych. Brak rozwiązań problemów ciepłochronności dla tego typu dzianin wskazuje na celowość podjęcia rozważanej tematyki.*

*Celem prac prowadzonych w ramach dysertacji doktorskiej było opracowanie modelu przepływu ciepła, który może być wykorzystany do projektowania dzianin futerkowych o wymaganych właściwościach termofizycznych. Zaprezentowany model opisu zjawiska przepływu ciepła ma uzasadnienie praktyczne w odniesieniu do dzianin futerkowych. Przyjęta metoda pozwala uniknąć badań wielu parametrów, ograniczając je do minimum: udział objętościowy poszczególnych składników w stosunku do każdej warstwy oraz stosunek grubości poszczególnych warstw do grubości całego wyrobu. Do badań wykorzystuje się powszechnie dostępne urządzenia pomiarowe. Uzyskuje się ponadto możliwość symulacji eksperymentu, bez konieczności wytwarzania dzianiny futerkowej. Metoda ta pozwala na dowolne modelowanie warunków brzegowych i początkowych, co nie zawsze jest możliwe dla metod empirycznych ze względu na ograniczenia sprzętowe.*

*Opracowany model obliczeniowy przepływu ciepła przez dzianiny futerkowe umożliwia uzyskanie rozkładu temperatury w tej konstrukcji oraz może stanowić punkt wyjścia doboru optymalnego struktury dla osiągnięcia*

*wymaganych właściwości wyrobów. Projektowanie dzianiny futerkowej o wymaganym poziomie izolacyjności cieplnej, z zastosowaniem przedstawionego modelu, może posłużyć do powstania rzeczywistego materiału o określonych właściwościach cieplochronnych.*

**Słowa kluczowe:** dzianiny futerkowe, modelowanie, temperatura, przewodzenie ciepła, przenikanie ciepła, opory cieplne, cieplochronność dzianin futerkowych

## 1. WSTĘP

Ochrona ciała człowieka przed wychłodzeniem w środowisku o obniżonej temperaturze jest zasadniczą funkcją powszechnie stosowanych w wyrobach odzieżowych i obuwiu dzianin futerkowych. Z uwagi na ich przeznaczenie, właściwości cieplochronne są podstawowym kryterium ich wartości użytkowej.

Znana literatura nie podejmuje szerzej kwestii przepływu ciepła przez tego typu dzianiny. Nieliczne pozycje pobieżnie opisują parametry ich struktury, cechy jakościowe oraz wpływ budowy futer dzianych na ich podstawowe właściwości użytkowe [poz. od 1 do 12]. Wśród aktualnych aktów normalizacyjnych nie występują normy odnoszące się bezpośrednio do dzianin futerkowych. Jest to tendencja przeciwna w stosunku do stanu badań na temat dzianin tradycyjnych. Jak wiemy, istnieje bogata literatura dotycząca różnych aspektów użytkowych dzianin tradycyjnych, w tym również przebiegu, modelowania i optymalizacji zjawisk ciepła i problemów z tym związanych.

Określenie zależności cech termometrycznych od parametrów strukturalnych rozpatrywanego materiału wymaga znajomości mechanizmów przekazywania ciepła przez tekstylia [poz. od 13 do 17], opartych na fundamentalnych zasadach wymiany ciepła [m.in. poz. od 18 do 29] oraz praktycznych metod ich wyznaczania [4, 14, 17, poz. od 30 do 41].

Problem z określeniem zależności termicznych dla dzianin futerkowych związany jest z trudnością w opisie samej dzianiny. Wyznaczenie parametrów dzianiny futerkowej o złożonej, przestrzennej, warstwowej budowie jest trudne do zdefiniowania geometrycznie, a także do wyznaczenia standardowymi metodami badawczymi. Składa się ona z warstwy spodniej i warstwy włosa, wykonanych z różnych surowców: przędzy, taśmy i kleju, o znacznym udziale powietrza w obu warstwach dzianiny, co utrudnia opis modelu fizycznego. Zakładając: jednopoziomowość runa dzianiny, równomierny rozkład gęstości włókien w okrywie oraz przędzy, włókien, kleju i powietrza w warstwie spodu dzianiny, przy założeniu, że wolne przestrzenie pomiędzy przędzami i włóknami w przędzach w warstwie spodniej wypełniają powietrze i klej, który nie przechodzi do warstwy okrywy, trójwymiarowy problem uproszczono do problemu dwuwymiarowego. Drogą homogenizacji poszczególnych warstw dzianiny uzyskano opis jej struktury poprzez udział objętościowy i współczynnik przewodzenia ciepła składników

poszczególnych warstw. Do wyznaczenia współczynnika przewodzenia ciepła posłużono się metodą mieszaniny, co ograniczyło zakres badań parametrów do udziałów objętościowych poszczególnych składników w stosunku do każdej warstwy.

Problem niustalonego przewodzenia ciepła jest opisywany równaniem przewodzenia określonym w obszarze dzianiny wcześniej poddanej homogenizacji, warunkami brzegowymi na częściach jej brzegu zewnętrznego oraz warunkiem początkowym w objętości i na brzegu zewnętrznym [patrz 18, 29]. Niustalone przewodzenie ciepła jest określone równaniem różniczkowym drugiego rzędu z uwagi na zmienną stanu (temperaturę) [poz. od 18 do 20].

Problem jest zbyt trudny do opisu i rozwiązania metodami analitycznymi, dlatego też do rozwiązania zagadnienia wymiany ciepła w dzianinach futerkowych wybrano metodę elementów skończonych [poz. od 42 do 51], dającą możliwość modelowania zhomogenizowanej konstrukcji dzianiny. Przyjęta metodologia obliczeń odbywa się przy zastosowaniu istniejących już programów, co pozwala na szybkie uzyskanie wyników. Dodatkowo wyniki te można w bardzo prosty sposób wizualizować przez program graficzny (np. ADINA). Metoda ta daje możliwość symulacji eksperymentu, w którym możemy dowolnie zakładać warunki brzegowe i początkowe, co nie zawsze jest możliwe w przypadku metod empirycznych ze względu na ograniczenia sprzętowe.

## **2. HOMOGENIZACJA STRUKTURY DZIANIN FUTERKOWYCH**

Dzianiny futerkowe są materiałami o złożonej, „warstwowej” budowie wewnętrznej, niejednorodnej mikroskopowo.

Opis budowy dzianin futerkowych i wyznaczenie parametrów struktury tych dzianin są dość problematyczne, z uwagi na:

- przestrzenną budowę dzianin;
- różnorodność surowców występujących w strukturze materiału, takich jak:
  - przędza (jedna lub dwie nitki tworzące warstwę wiążącą);
  - taśma (występująca w warstwie wiążącej i warstwie włosa), składająca się z włókien jednego rodzaju lub będąca mieszanką dwóch lub trzech rodzajów włókien, o jednakowych bądź różnych grubościach i długościach;
  - klej – jednego typu albo mieszanka dwóch rodzajów klejów;
- znaczny udział powietrza zawartego w porach włókien i przędz oraz w dzianinie;
- proces technologiczny produkcji dzianin futerkowych z taśmy zgrzeblarkowej (włókna wrabiane są w oczka dzianiny zasadniczej w postaci runa na przypadkowych długościach, tworząc okrywę wielopoziomową);
- szeroką gamę procesów wykończalniczych, wykonywanych w różnych kolejnościach, prowadzących do uzyskania zróżnicowanych struktur powierzchni w warstwie włosa;

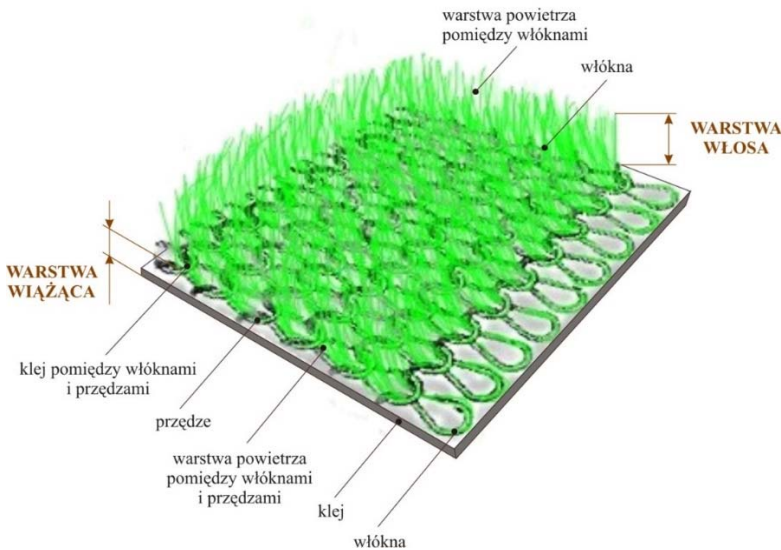
- brak norm dotyczących badań podstawowych parametrów struktury odnoszących się do tego typu dzianin;
- udział kleju uniemożliwiający wyznaczenie standardowymi metodami niektórych parametrów typowych dla określenia tradycyjnych dzianin płaskich 2D (długość przędzy w oczku, rodzaj, masa liniowa i skręt przędzy występującej w warstwie wiążącej) w wykończonych dzianinach futerkowych.

Do opisu budowy dzianiny zastosowano następujące uproszczenia:

1. Założono jednopoziomowość runa dzianiny – wszystkie włókna tworzące warstwę włosa wykończonej dzianiny są tej samej długości i zapełniają równomiernie powierzchnię okrywy dzianiny (równomierny rozkład gęstości włókien w okrywie).
2. Przyjęto równomierny rozkład przędz/przędzy, włókien, kleju i powietrza w warstwie wiążącej dzianiny, zakładając, że wolne przestrzenie pomiędzy przędzami i włóknami w przędzach wypełniają powietrze i klej.
3. Założono, że klej nie przechodzi do warstwy okrywy.

Biorąc pod uwagę powyższe, przyjęto, że trójwymiarowa struktura dzianiny futerkowej (rys. 2.1) składa się z dwóch części:

- *warstwy wiążącej*, w skład której wchodzi: przędza/przędze tworzące splot lewoprawy, włókna – w oczkach splotu oraz klej i powietrze znajdujące się na spodzie dzianiny i zajmujące wolne przestrzenie pomiędzy włóknami i przędzami;
- *warstwy włosa*, wypełnionej włóknami, pomiędzy którymi znajduje się powietrze.



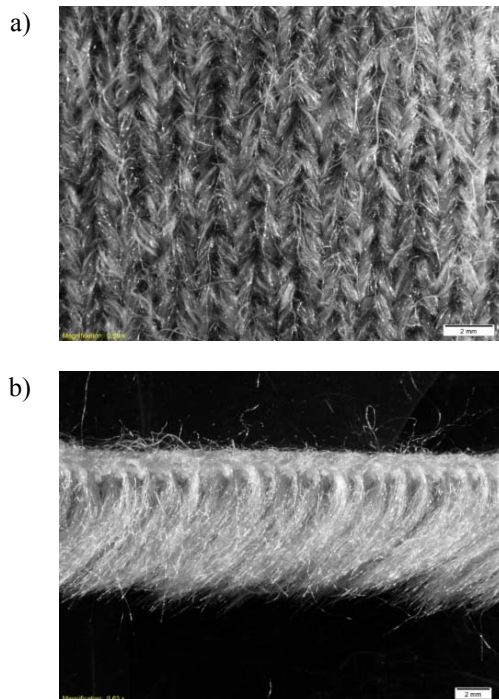
Rys. 2.1. Model trójwymiarowej struktury dzianiny futerkowej

Źródło: opracowanie własne.

Modelowanie przepływu ciepła w przypadku dzianin futerkowych jest procesem trudnym i złożonym. Trójwymiarowy problem można uprościć do problemu dwuwymiarowego poprzez homogenizację poszczególnych warstw dzianiny, prowadzącą do opisu jej struktury poprzez udział objętościowy i współczynnik przewodzenia ciepła, składających się na poszczególne warstwy składników (włókien, kleju i powietrza). Do wyznaczenia współczynnika przewodności cieplnej przyjęto metodę mieszaniny, która pozwala na uniknięcie badań wielu parametrów materiału, ograniczając je do minimum (udział objętościowy poszczególnych składników w stosunku do każdej warstwy). Oszczędza to czas i koszty związane z badaniami.

### 3. MODEL TEORETYCZNY PRZEWODZENIA CIEPŁA PRZEZ DZIANINY FUTERKOWE

Założmy, że dzianina futerkowa (rys. 3.1) ma taki sam kształt i wymiary na całej długości rozpatrywania.

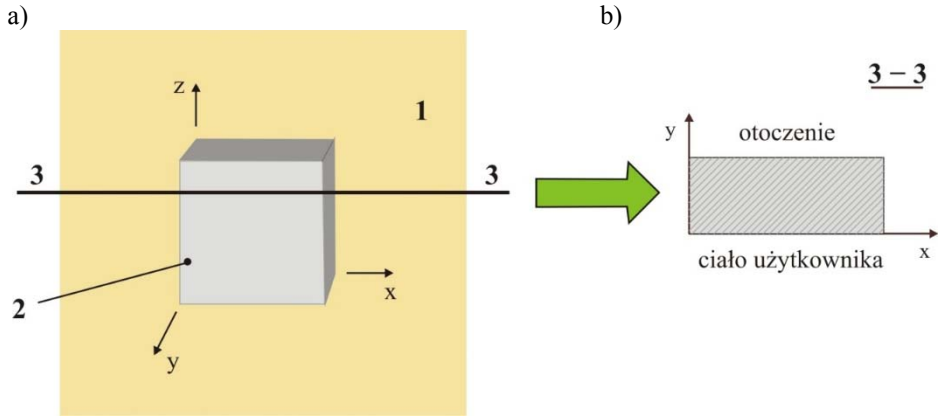


Rys. 3.1 Dzianina futerkowa:

- a) warstwa wiążąca dzianiny (warstwa spodnia),
- b) przekrój dzianiny futerkowej

*Źródło: opracowanie własne.*

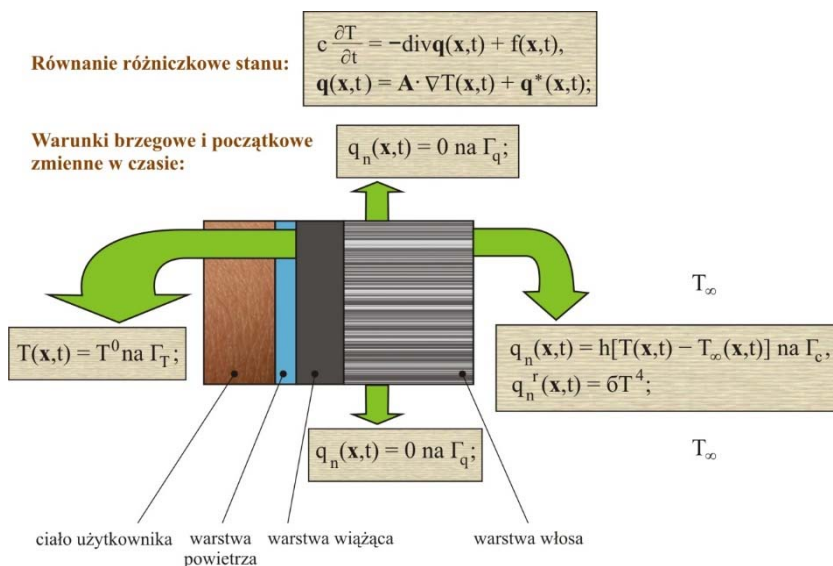
Problem przestrzenny (trójwymiarowy) można zredukować do płaskiego (dwuwymiarowego) (patrz rys. 3.2).



Rys. 3.2. Trójwymiarowa dzianina futerkowa i redukcja problemu do układu płaskiego [52, 53]: a) problem w przestrzeni trójwymiarowej;  $x, y, z$  – trójwymiarowy kartezjański układ współrzędnych; b) problem płaski;  $x, y$  – dwuwymiarowy kartezjański układ współrzędnych; 1 – skóra ludzka; 2 – dzianina futerkowa; 3 – dowolny przekrój dzianiny

*Źródło: opracowanie własne.*

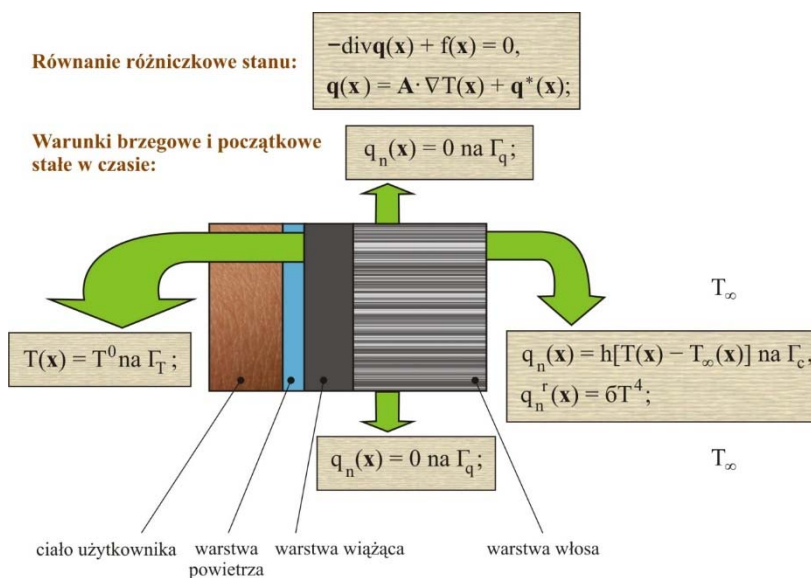
Rozważmy przewodzenie ciepła przez dzianinę futerkową od ciała użytkownika na zewnątrz. Problem nieustalonego przewodzenia ciepła (rys. 3.3) jest opisywany równaniem określonym w obszarze dzianiny wcześniej poddanej homogenizacji, warunkami brzegowymi na częściach jej brzegu zewnętrznego oraz warunkiem początkowym w objętości i na brzegu zewnętrznym. Nieustalone przewodzenie ciepła jest określone równaniem różniczkowym drugiego rzędu z uwagi na zmienną stanu (temperaturę). Warunek brzegowy Dirichleta określa temperaturę na odcinku brzegu  $\Gamma_T$ , Neumanna – gęstość strumienia ciepła w kierunku normalnym do brzegu na części  $\Gamma_q$ , Newtona – gęstość konwekcyjnego strumienia ciepła w kierunku normalnym do fragmentu brzegu  $\Gamma_c$ , odpowiednio warunek promieniowania – gęstość strumienia ciepła oddanego przez promieniowanie. Z uwagi na jednokierunkowość przepływu ciepła przyjmuje się jego gęstość w warunku Neumanna równą zero na brzegach bocznych. Warunek początkowy definiuje rozkład temperatury wyrobu na początku przewodzenia ciepła.



Rys. 3.3. Model przewodzenia ciepła przez dzianiny futerkowe w warunkach niestabilnych

Źródło: opracowanie własne.

Określony w ten sposób problem można rozwiązać w szczególnych przypadkach bezpośrednio, zwłaszcza dla ustalonego przewodzenia ciepła (rys. 3.4).



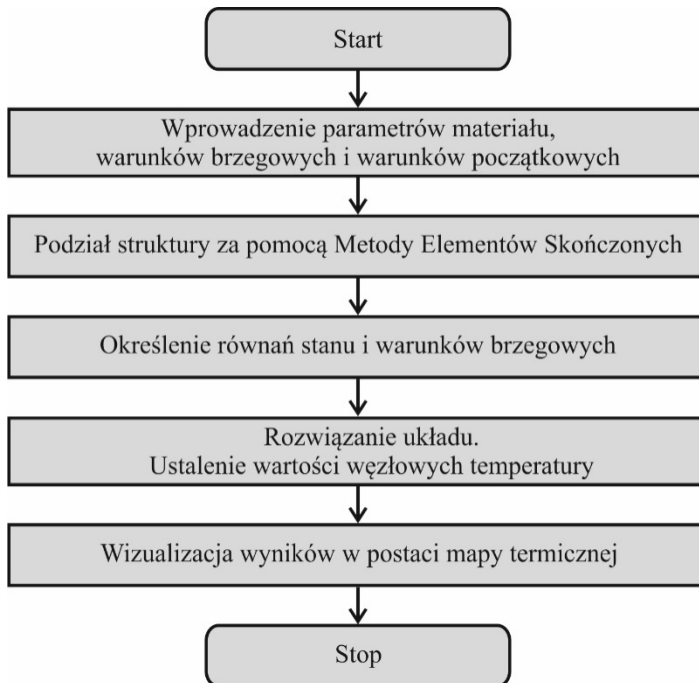
Rys. 3.4. Model przewodzenia ciepła przez dzianiny futerkowe w warunkach ustalonych

Źródło: opracowanie własne.

Wykorzystując metodę elementów skończonych, opartą na dyskretyzacji obszaru geometrycznego i przedziału czasowego na skończoną liczbę elementów, uzyskać można przybliżone rozwiązania. Przyjęta metoda pozwala na określenie pola temperatury metodą aproksymacji węzłowych wartości temperatury. Problem polega w tym przypadku na rozwiązaniu podstawowego równania MES w postaci:

$$T = \sum_{i=1}^{NP} N_i T_i^e, \quad (3.1)$$

gdzie:  $T$  jest przybliżonym rozwiązaniem temperatury,  $NP$  to liczba węzłów w siatce podziału na elementy,  $T_i^e$  oznacza węzłową wartość temperatury,  $N_i$  funkcję kształtu przyporządkowaną  $i$ - temu węzłowi. Takie podejście do problemu pozwala na określenie rozkładu temperatury przy założonych dowolnie warunkach brzegowych i początkowych, co nie zawsze jest możliwe w przypadku metod empirycznych ze względu na ograniczenia sprzętowe. Wyznaczenie mapy temperatury można rozwiązać przez algorytm przedstawiony na rys. 3.5.



Rys. 3.5. Metoda rozwiązania problemu przepływu ciepła przez dzianiny futerkowe  
Źródło: opracowanie własne.

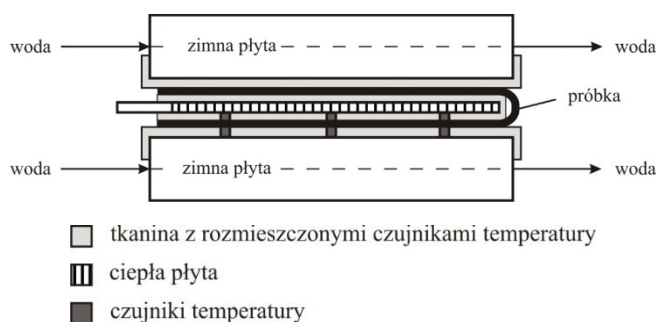


## 4. WERYFIKACJA DOŚWIADCZALNA MODELU

### 4.1. Metodyka badań właściwości termicznych futer dzianych

#### *Wyznaczanie współczynnika przewodzenia ciepła*

Pomiary właściwości cieplnych dzianin futerkowych zostały wykonane za pomocą przyrządu Tilmel 75, skonstruowanego w Katedrze Automatykacji Procesów Włókienniczych PŁ. Podstawowym zastosowaniem urządzenia jest pomiar przewodności cieplnej. Wykorzystując elementy jego budowy, można również mierzyć współczynnik przenikania ciepła. Pomiary można wykonywać dla pojedynczej warstwy materiału bądź dla wielowarstwowych pakietów tekstylnych.



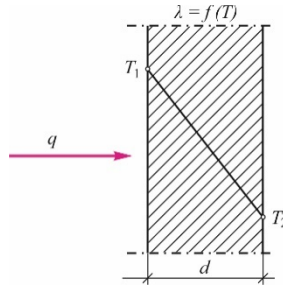
Rys. 4.1.1. Uproszczony schemat stanowiska do pomiaru współczynnika przewodzenia ciepła [54]

*Źródło: literatura poz. [54].*

W celu określenia zjawiska ustalonego przewodzenia ciepła przez badane próbki, dzianinę futerkową o budowie złożonej (warstwa splotu, okrywa włókienna) poddano homogenizacji, otrzymując materiał jednorodny, dla którego przyjęto następujące założenia:

1. Dzianiny posiadają stałą grubość  $d$  (średnia arytmetyczna pomiarów grubości próbek), znacznie mniejszą od wymiarów próbek w pozostałych kierunkach ( $120 \times 300$  mm).
2. Każda z badanych dzianin charakteryzuje się stałym współczynnikiem przewodzenia ciepła  $\lambda$ , czyli jest traktowana jako materiał izotropowy.
3. Na zewnętrznych powierzchniach dzianin utrzymywane są stałe temperatury. Temperatura powierzchni próbki od strony płyty grzejnej (od strony splotu dzianiny) równa  $T_1$  wynosi  $32^\circ\text{C}$  i jest wyższa od temperatury powierzchni próbki od strony płyty zimnej (od strony włosa)  $T_2$ , czyli  $T_1 > T_2$ .
4. Powierzchnie izotermiczne są równoległe do powierzchni próbki.

W związku z powyżej przyjętym uproszczeniem budowy futer dzianych wszystkie wartości mierzone i zależności z nich wynikające odnoszą się do całej dzianiny, a nie do jej poszczególnych warstw i są to wielkości zastępcze. Schematycznie zjawisko przewodzenia ciepła przedstawiono na rys. 4.1.2.



Rys. 4.1.2. Przewodzenie ciepła przez ściankę płaską [14]

Źródło: literatura poz. [14].

Zgodnie z [13, 14] zjawisko przewodzenia badane na konduktometrze cieplnym Tilmel 75 opisuje następujący wzór:

$$\lambda = \frac{qd}{\Delta T} = \frac{U^2 d}{2 \cdot F \cdot R \cdot \Delta T}, \quad \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{C}}, \quad (4.1.1)$$

gdzie:  $q$  – strumień ciepła przenikający przez próbkę,  $\text{W}/\text{m}^2$ ,  
 $U$  – napięcie zasilające grzałkę,  $\text{V}$ ,  
 $d$  – grubość próbki,  $\text{m}$ ,  
 $F$  – powierzchnia pomiarowa po jednej stronie grzałki,  $F = 0,1 \cdot 0,1 \text{ m}^2$ ,  
 $R$  – rezystancja drutu oporowego, równa  $R = 884 \Omega$ ,  
 $\Delta T$  – różnica temperatur po obu stronach próbki,  $\Delta T = T_1 - T_2$ ,  $^\circ\text{C}$ .

Pomijając zjawisko unoszenia i promieniowania ciepła, opór cieplny przy przewodzeniu [14] wynosi:

$$R_\lambda = \frac{d}{\lambda}, \quad \frac{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}{\text{W}} \quad (4.1.2)$$

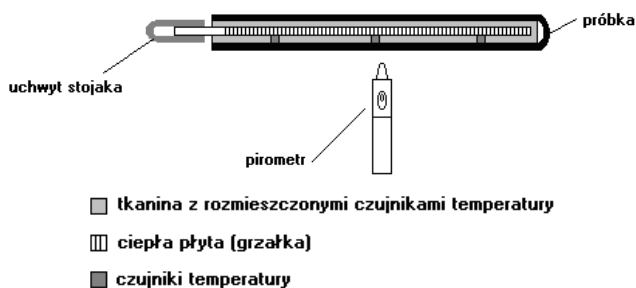
### Wyznaczanie współczynnika przenikania ciepła

Badanie współczynnika przenikania ciepła przeprowadzono na stanowisku pomiarowym, w którym wykorzystano część elementów budowy przyrządu Tilmel 75. Schematycznie budowę stanowiska pomiarowego przedstawiono na rys. 4.1.3.

Do opisu zjawiska przenikania ciepła przez dzianiny futerkowe przyjęto następujące założenia:

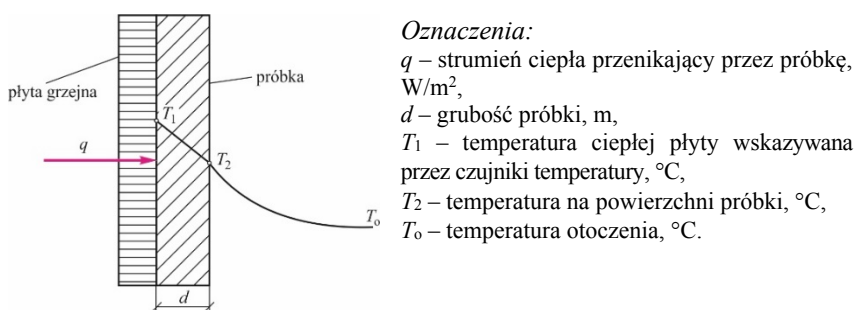
1. Dzianiny posiadają stałą grubość  $d$ .
2. Temperatura powierzchni próbki od strony grzejnika (od strony splotu dzianiny)  $T_1$  jest równa  $32^\circ\text{C}$  i jest wyższa od temperatury otoczenia  $T_0$ , czyli:  $T_1 > T_2 > T_0$ , gdzie  $T_2$  – temperatura dzianiny od strony włosa.
3. Próbki dolegają do płyty grzejnej, w związku z czym pomija się opór cieplny wnikańia ciepła od powierzchni grzałki do warstwy dzianiny.

Na skutek różnicy temperatur pomiędzy ciepłą płytą a otoczeniem następuje wymiana ciepła, na drodze konwekcji, radiacji i przewodzenia. Ciepło z płyty grzejnej przenika przez próbkę, po czym emitowane jest do otoczenia (rys. 4.1.4).



Rys. 4.1.3. Schemat stanowiska do pomiaru współczynnika przenikania ciepła (widok z góry)

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 4.1.4 Schemat przenikania ciepła przez próbkę dla stanowiska do pomiaru współczynnika przenikania ciepła

Źródło: opracowanie własne.

Zgodnie z przyjętymi założeniami badane zjawisko opisać można wzorem:

$$k = \frac{1}{\frac{d}{\lambda} + \frac{1}{\alpha}}, \quad (4.1.3)$$

gdzie:  $k$  – współczynnik przenikania ciepła,  $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ,

$\lambda$  – współczynnik przewodzenia ciepła zbadany uprzednio na przyrządzie Tilmet 75,  $W/(m \cdot ^\circ C)$ ,

$d$  – grubość próbki, m,

$\alpha$  – współczynnik przejmowania ciepła do otoczenia uwzględniający konwekcję i promieniowanie,  $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ .

Współczynnik przenikania ciepła wyrazić można również jako:

$$k = \frac{1}{\frac{d}{\lambda} + \frac{T_2 - T_0}{q}}. \quad (4.1.4)$$

Całkowity opór cieplny przenikania ciepła wynosi:

$$R_k = \frac{1}{k}, \quad (4.1.5)$$

natomiast opór cieplny przejmowania ciepła określony jest wzorem:

$$R_\alpha = \frac{1}{\alpha}. \quad (4.1.6)$$

## 4.2. Badania wstępne

Badania wstępne obejmowały 11 wariantów rządkowych dzianin futerkowych, wykonanych z jednolitych surowców, zróżnicowanych pod względem grubości oraz masy powierzchniowej. Próbki futer dzianych zbadano pod względem współczynnika przewodzenia i przenikania ciepła w warunkach ustalonych, na urządzeniu Tilmet 75.

### *Wyniki badań współczynnika przewodzenia ciepła*

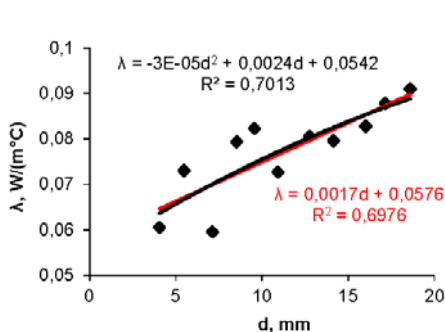
Dla dzianin futerkowych wyznaczono grubość pod naciskiem  $N = 1 \cdot 10^2 \text{ N/m}^2$  na maszynie wytrzymałościowej H 50K-S oraz masę powierzchniową. Wyniki zestawiono w tablicy 4.1.1.

Tablica 4.1.1. Wyznaczone parametry techniczne dzianin futerkowych

Oznaczenie próbki	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
Grubość dla $N = 1 \cdot 10^2$ N/m <sup>2</sup>	4,05	5,48	7,13	8,54	9,56	10,92	12,76	14,15	16,02	17,16	18,60
$d$											
mm											
Masa powierzchniowa	199,7	224,3	355,2	425,6	374,7	526,9	545,3	633,6	705,1	708,5	703,2
$G$											
$\cdot 10^{-3}$ kg/m <sup>2</sup>											

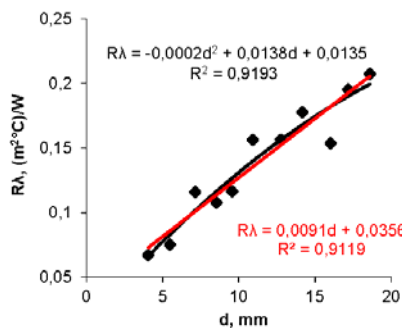
Źródło: opracowanie własne.

Dla każdego wariantu dzianin wykonano 5 pomiarów współczynnika przewodzenia ciepła. Otrzymane wyniki badań przedstawiono na rys. 4.2.1÷4.2.4.



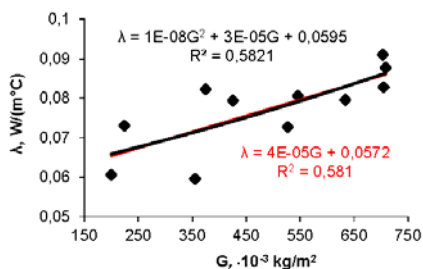
Rys. 4.2.1. Wykres zależności  $\lambda = f(d)$

Źródło: opracowanie własne.



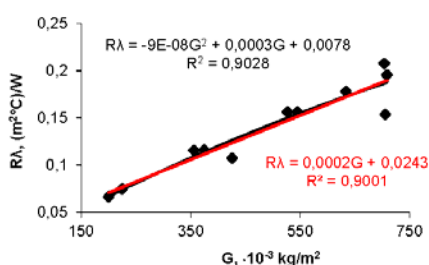
Rys. 4.2.2. Wykres zależności  $R_\lambda = f(d)$

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 4.2.3. Wykres zależności  $\lambda = f(G)$

Źródło: opracowanie własne



Rys. 4.2.4. Wykres zależności  $R_\lambda = f(G)$

Źródło: opracowanie własne.

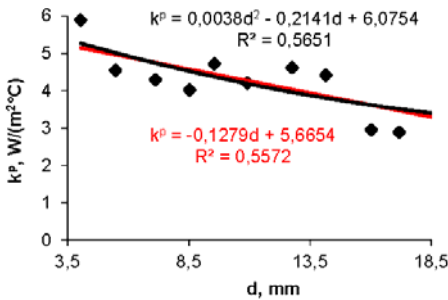
### Wyniki badań współczynnika przenikania ciepła

Na stanowisku pomiarowym, w którym wykorzystano część budowy przyrządu TILMET, przeprowadzono badania współczynnika przenikania ciepła.

Na podstawie otrzymanych wyników wyznaczono:

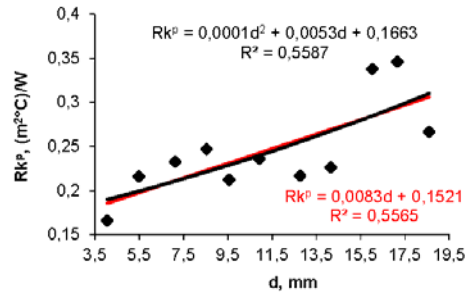
- $k^p$  – współczynnik przenikania ciepła dla temperatury  $T_2$  zmierzonej pirometrem,  $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ,
- $k$  – współczynnik przenikania ciepła dla temperatury  $T_2$  otrzymanej w wyniku obliczeń,  $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ,
- $\alpha$  – współczynnik przyjmowania ciepła do otoczenia,  $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ,
- $R_k^p$  – opór cieplny przy przenikaniu ciepła obliczony ze współczynnika przenikania ciepła  $k^p$ ,  $(m^2 \cdot ^\circ C)/W$ ,
- $R_k$  – opór cieplny przy przenikaniu ciepła obliczony ze współczynnika przenikania ciepła  $k$ ,  $(m^2 \cdot ^\circ C)/W$ ,
- $R_\alpha$  – opór cieplny przyjmowania ciepła,  $(m^2 \cdot ^\circ C)/W$ .

Interpretację graficzną wyników badań współczynnika przenikania ciepła dla temperatury zmierzonej pirometrem oraz obliczonego na jego podstawie oporu cieplnego przy przenikaniu ciepła przedstawiono na rysunkach 4.2.5÷4.2.8.



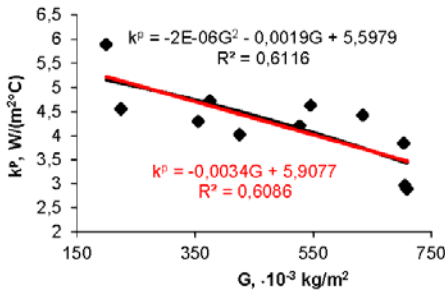
Rys. 8. Wykres zależności  $k^p = f(d)$

Źródło: opracowanie własne.



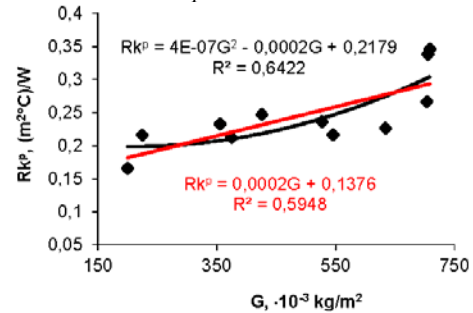
Rys. 9. Wykres zależności  $R_k^p = f(d)$

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 10. Wykres zależności  $k^p = f(G)$

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 11. Wykres zależności  $R_k^p = f(G)$

Źródło: opracowanie własne.

### **Wnioski**

1. Dla badanych dzianin futerkowych wartości współczynników przewodzenia ciepła kształtowały się w zakresie  $(0,0595 \div 0,0910)$   $W/(m \cdot ^\circ C)$ , przy czym cieńsze dzianiny charakteryzuje mniejsza przewodność cieplna niż dzianiny grubsze. Ze wzrostem masy powierzchniowej dzianin rośnie współczynnik przewodzenia ciepła.
2. Na podstawie przeprowadzonych badań przewodzenia ciepła stwierdzić można, że jednoczesny wzrost grubości i masy powierzchniowej dzianin futerkowych wpływa w znaczny sposób na polepszenie właściwości ciepłochronnych (większy opór cieplny dla dzianin grubszych i o większej masie powierzchniowej). Wartości oporu cieplnego przewodzenia kształtowały się w zakresie  $(0,0669 \div 0,2074)$   $(m^2 \cdot ^\circ C)/W$ .
3. Badane dzianiny charakteryzowały się współczynnikami przenikania ciepła  $k^p$  rzędu od 2,89 do 5,89  $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ . Z wyników badań współczynnika przenikania ciepła wynika, że wartość współczynnika przenikania ciepła  $k^p$  jest największa dla dzianin o najmniejszej grubości i masie powierzchniowej i maleje dla dzianin grubszych o dużej masie powierzchniowej.
4. Zaobserwowano wpływ wzrostu grubości i masy powierzchniowej na wzrost oporu cieplnego przy przenikaniu, co świadczy o lepszych właściwościach termoizolacyjnych grubszych dzianin futerkowych.
5. Specyficzna charakterystyka dzianin futerkowych (większa masa powierzchniowa dzianin o większej grubości) nie pozwala na określenie, która cecha ma większy wpływ na otrzymane wyniki badań, grubość czy masa powierzchniowa.
6. Celowym jest przyjęcie do opisu budowy dzianin futerkowych takich parametrów określających ich strukturę, które pozwoliłyby w sposób jednoznaczny na wyznaczenie zależności cieplnych w tego typu materiałach.

### **4.3. Badania zasadnicze**

Analiza wyników badań wskazała na konieczność przeprowadzenia dalszych badań. Do badań przyjęto dzianiny o zróżnicowanej długości włosa oraz gramaturze, poddane różnorodnym procesom wykończalniczym (strzyżenie, podklejanie, nabłyszczanie, wykurczanie/rozciąganie, baranizowanie, rozpulchnianie), przeprowadzanym w różnych kolejnościach.

Dla wykończonych dzianin futerkowych wyznaczono standardowe parametry techniczne, zestawione w tablicy 4.3.1. Dodatkowo w tablicy podano niektóre parametry technologiczne związane z przeprowadzanymi operacjami wykończalniczymi: zawartość apretury, szerokość podklejenia czy wysokość strzyżenia.

Tablica 4.3.1. Zestawienie parametrów techniczno-technologicznych wykończonych dzianin

Oznaczenie próbki	Szerokość z krawką	Szerokość podklejenia	Masa liniowa	Masa powierzchniowa	Zawartość apretury	Ścisłość rządkowa	Ścisłość kolumniowa	Wysokość strzyżenia
	cm	cm	$\cdot 10^{-3}$ kg/mb	$\cdot 10^{-3}$ kg/m <sup>2</sup>	$\cdot 10^{-3}$ kg/mb	rząd./10cm	kol./10cm	mm
1	150	145	434	289	10-20	75,5	61	9
2	150	145	790	527	50-60	103,0	61	40
3	150	145	750	500	50-60	97,1	61	15
4	150	145	650	433	50-60	93,5	61	0
5	150	145	785	523	50-60	104,8	61	15
6	150	145	440	293	50-60	77,7	61	10
7	150	145	500	333	50-60	98,7	61	5
8	160	155	660	413	50-60	100,0	66	Bez strzyż.
9	150	145	440	293	50-60	77,2	61	10
10	150	145	590	393	50-60	100,0	61	18
11	150	145	880	587	50-60	109,5	61	60

Źródło: opracowanie własne.

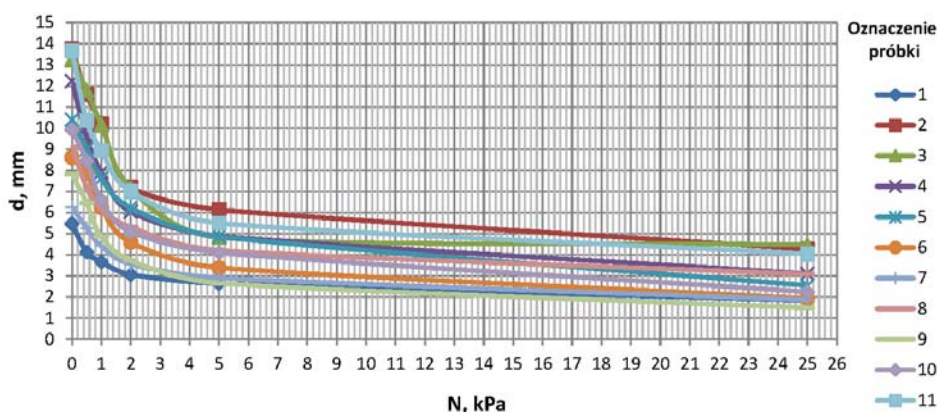
Analiza aktów normalizacyjnych wykazała, że obecnie nie ma norm (PN, EN, ISO) odnoszących się bezpośrednio do dzianin futerkowych.

Zgodnie z wycofaną normą PN-P-01724:1976 [55] do podstawowych wskaźników charakteryzujących wyroby futerkowe wierzchnie dziane, gładkie i wzorcowane, jedno- i wielopoziomowe zalicza się: skład surowcowy, liczbę rządków i kolumniek na 10 cm, szerokość oraz masę powierzchniową i liniową. Przeprowadzone badania wstępne wykazały, że nie da się określić w sposób jednoznaczny związku przepływu ciepła z podanymi w normie podstawowymi parametrami dla tego typu dzianin. Jako wskaźniki uzupełniające norma podaje: numerację, kierunek i liczbę skrętów nitki, wrobienie, masę powierzchniową runa, grubość, wysokość okrywy runowej, splot, rodzaj i zawartość apretury, zawartość tłuszczu w okrywie runowej wewnętrznej, pH wyrobu oraz zawartość formaldehydu dla wyrobów wykończonych żywicami termoaktywnymi. Spośród nich największe znaczenie z punktu widzenia właściwości termoizolacyjnych wyrobu ma grubość dzianiny futerkowej, jednocześnie jest to parametr dość problematyczny do analizy, z uwagi na silną zależność wyniku pomiaru od warunków przeprowadzenia badania.



### Wyznaczanie grubości dzianin futerkowych

Pomiary grubości wykończonych dzianin futerkowych, wykonane w ramach badań zasadniczych przy różnych naciskach (0,5 kPa, 1 kPa, 2 kPa, 5 kPa, 25 kPa) i bez obciążenia, potwierdziły ścisłą zależność wyników pomiarów od stosowanego nacisku (rys. 4.3.1). Badania wstępne oraz badania zasadnicze wykazały, że sama grubość wyrobu nie jest wskaźnikiem, który pozwala na wyjaśnienie zjawiska przepływu ciepła przez dzianiny futerkowe.



Rys. 4.3.1. Wpływ nacisku na grubość dzianin futerkowych

Źródło: opracowanie własne.

W związku z przyjęciem do opisu zależności cieplnych od struktury dzianin futerkowych jednej z metod homogenizacji – metody mieszaniny, dokonano przeglądu metodyk badawczych w zakresie pomiarów: grubości, gęstości oraz masy przeprowadzanych dla materiałów i wyrobów tekstylnych oraz poszczególnych warstw tych materiałów [poz. od 56 do 67].

Do opisu złożonej konstrukcji dzianin futerkowych wykorzystano:

- innowacyjne, nieznormalizowane metody badań,
- metody znormalizowane, niestosowane dla tego rodzaju materiałów, wykorzystujące ogólnie dostępne urządzenia pomiarowe.

Dla badanych dzianin futerkowych wyznaczono:

- udział elementów w warstwie okrywy,
- udział elementów w warstwie wiążącej,
- współczynnik przewodzenia ciepła dla zastosowanych do podklejenia dzianin futerkowych klejów (Triotex TBP, Triotex TRM-S),
- współczynnik przewodzenia ciepła dzianin futerkowych na podstawie pomiarów na urządzeniu Tilmert 75.
-

### Udział elementów w warstwie okrywy

Wykończone dzianiny futerkowe zestrzyżono i zmierzono grubość warstwy wiążącej (spodu) dzianin pod trzema naciskami: 1 kPa, 5 kPa i 25 kPa. Wyniki badań stanowiły średnią z 10 pomiarów wykonanych dla każdego wariantu dzianiny.

Grubość warstwy okrywy wyznaczono jako różnicę pomiędzy grubością wykończonej dzianiny futerkowej a grubością jej warstwy spodniej. Dla grubości badanych pod naciskiem  $N = 1$  kPa:

$$d_{ok.1} = d_1 - d_{sp.1}, \quad (4.3.1)$$

dla grubości wyznaczonych pod naciskiem  $N = 5$  kPa:

$$d_{ok.5} = d_5 - d_{sp.5}. \quad (4.3.1a)$$

Zakładając, że w warstwie okrywy dzianiny futerkowej badanej pod naciskiem  $N = 25$  kPa nie występuje powietrze, obliczono grubość zajmowaną przez włókna tworzące włos dzianiny:

$$d_{w.25} = d_{25} - d_{sp.25}. \quad (4.3.2)$$

Przyjmując określone wymiary próbek badanych dzianin (długość i szerokość), wyznaczyć można objętość warstwy okrywy oraz objętość zajmowaną przez włókna tworzące włos dzianiny futerkowej. Dla próbek o wymiarach (10x10) cm obliczono:

- objętość warstwy okrywy, wyznaczoną dla grubości badanej pod naciskiem  $N = 1$  kPa, wg wzoru:

$$V_{ok.1} = 10 \cdot 10 \cdot d_{ok.1} \cdot 10^{-7}, \quad m^3 \quad (4.3.3)$$

- objętość warstwy okrywy, wyznaczoną dla grubości badanej pod naciskiem  $N = 5$  kPa:

$$V_{ok.5} = 10 \cdot 10 \cdot d_{ok.5} \cdot 10^{-7}, \quad m^3 \quad (4.3.3a)$$

- objętość zajmowaną przez włókna w warstwie okrywy, obliczoną z grubości wyznaczonej pod naciskiem  $N = 25$  kPa:

$$V_{w.25} = 10 \cdot 10 \cdot d_{w.25} \cdot 10^{-7}, \quad m^3 \quad (4.3.4)$$

a następnie wyznaczono współczynniki objętościowe włókien ( $\xi_{w.1 ok.}$ ) i powierza ( $\xi_{pow.1 ok.}$ ) w warstwie okrywy dzianiny futerkowej dla grubości badanej pod naciskiem  $N = 1$  kPa oraz współczynniki objętościowe włókien ( $\xi_{w.5 ok.}$ ) i powierza ( $\xi_{pow.5 ok.}$ ) dla grubości wyznaczonej pod naciskiem  $N = 5$  kPa, z następujących zależności:

$$\xi_{w.1 ok.} = \frac{V_{w.25}}{V_{ok.1}}, \quad (4.3.5)$$

$$\xi_{w.5 \text{ ok.}} = \frac{V_{w.25}}{V_{ok.5}}, \quad (4.3.5a)$$

$$\xi_{pow.1 \text{ ok.}} = \frac{V_{pow.25}}{V_{ok.1}} = 1 - \xi_{w.1 \text{ ok.}}, \quad (4.3.6)$$

$$\xi_{pow.5 \text{ ok.}} = \frac{V_{pow.25}}{V_{ok.5}} = 1 - \xi_{w.5 \text{ ok.}}. \quad (4.3.6a)$$

### Udział elementów w warstwie wiążącej (warstwie spodu)

Zestrzyżone próbki badanych dzianin:

- wykończonych (podklejonych) o wielkości (10x10) cm,
- niepoddanych operacjom wykończalniczym (niepodklejonych), o wymiarach równych liczności rządów i kolumnienek występujących na długości 10 cm i szerokości 10 cm w wykończonych dzianinach,

zważono, a następnie wyznaczono masę kleju ( $m_{k \text{ sp.}}$ ), jako różnicę mas próbki podklejonej ( $m_{sp. p}$ ) i niepodklejonej ( $m_{sp. np}$ ). Masy obliczono jako średnie z pomiaru 4 próbek.

Zestrzyżone próbki dzianin niepoddanych operacjom wykończalniczym (niepodklejonych), o wymiarach równych liczności rządów i kolumnienek występujących na długości 10 cm i szerokości 10 cm w wykończonych dzianinach spruto, oddzielając włókna tworzące włos dzianiny od przędz i zważono. Obliczono objętość spodu wykończonej dzianiny futerkowej dla grubości wyznaczonej pod naciskiem  $N = 1 \text{ kPa}$  ( $V_{sp.1}$ ) oraz  $N = 5 \text{ kPa}$  ( $V_{sp.5}$ ):

$$V_{sp.1} = 10 \cdot 10 \cdot d_{sp.1} \cdot 10^{-7}, \quad \text{m}^3 \quad (4.3.7)$$

$$V_{sp.5} = 10 \cdot 10 \cdot d_{sp.5} \cdot 10^{-7}, \quad \text{m}^3 \quad (4.3.7a)$$

Kleje Triotex TBP oraz Triotex TRM-S naniesiono na płytki ze szkła hartowanego, wycięto z nich próbki klejonek o wymiarach (20x10) cm i poddano procesowi ogrzewania w temperaturze 150°C, zważono, zbadano ich grubość pod naciskiem 1 kPa, a następnie wyznaczono ich gęstość ze wzoru:

$$\rho_k = \frac{m_k}{V_k} \cdot 10^3, \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (4.3.8)$$

Gęstości klejonek będących mieszaniną dwóch rodzajów klejów wyznaczono jako średnie gęstości wynikające z udziałów wagowych stosowanych przy mieszanii tych klejów.

Przyjmując, że gęstość włókien poliestrowych  $\rho_{w \text{ PES}} = 1,38 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ , gęstość włókien akrylowych  $\rho_{w \text{ AN}} = 1,17 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$  oraz gęstość kleju – zgodnie z powyższym, wyznaczono objętość zajmowaną przez poszczególne składniki

w spodzie wykończonej dzianiny futerkowej, wg. poniższych wzorów (odpowiednio dla grubości wyznaczonej pod naciskiem  $N = 1$  kPa i grubości wyznaczonej pod naciskiem  $N = 5$  kPa):

$$V_{w\ sp.} = \frac{m_{w\ sp.}}{\rho_{w\ AN}} \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \quad (4.3.9)$$

$$V_{prz\ sp.} = \frac{m_{p\ sp.}}{\rho_{w\ PES}} \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \quad (4.3.9a)$$

$$V_{k\ sp.} = \frac{m_{k\ sp.}}{\rho_k} \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \quad (4.3.9b)$$

$$V_{pow\ sp.} = V_{sp.1} - V_{w\ sp.} - V_{p\ sp.} - V_{k\ sp.} \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \quad (4.3.10)$$

Dla warstwy spodu wyznaczono współczynniki objętościowe włókien ( $\xi_{w\ sp.}$ ), przędzy ( $\xi_{prz\ sp.}$ ), kleju ( $\xi_{k\ sp.}$ ) i powierza ( $\xi_{pow\ ok.}$ ), odpowiednio dla grubości wyznaczonych

pod naciskiem  $N = 1$  kPa oraz  $N = 5$  kPa, z następujących zależności:

$$\xi_{w\ sp.} = \frac{V_{w\ sp.}}{V_{sp.}}, \quad (4.3.11)$$

$$\xi_{prz\ sp.} = \frac{V_{prz\ sp.}}{V_{sp.}}, \quad (4.3.11a)$$

$$\xi_{k\ sp.} = \frac{V_{k\ sp.}}{V_{sp.}}, \quad (4.3.11b)$$

$$\xi_{pow\ sp.} = \frac{V_{pow\ sp.}}{V_{sp.}} = 1 - \xi_{w\ sp.} - \xi_{prz\ sp.} - \xi_{k\ sp.}. \quad (4.3.11c)$$

### **Wyniki badań współczynnika przewodzenia ciepła**

Z uwagi na brak w specjalistycznej literaturze danych o wartości współczynnika przewodzenia ciepła dla zastosowanych do podklejenia dzianin futerkowych klejów Triotex TBP i TRM-S, dla klejów wyznaczono współczynniki przewodzenia ciepła – badania przeprowadzone na próbkach klejonek. Wyznaczone współczynniki przewodzenia ciepła ujęto w tablicy 4.3.2.

Dla 11 wariantów wykończonych dzianin futerkowych wyznaczono współczynniki przewodzenia ciepła na urządzeniu Tilmel 75 dla grubości zmierzonych przy nacisku  $N = 1$  kPa ( $\bar{d}_1$ ) i  $N = 5$  kPa ( $\bar{d}_5$ ) (wartości średnie z 5 pomiarów). Wyniki badań podano w tablicy 4.3.3.

Tablica 4.3.2. Wartości współczynników przewodzenia ciepła klejonek

KLEJ TBP:								
Oznaczenie próbki	1	2	3	4	5	6	7	Wartość średnia
Współczynnik przewodzenia ciepła	0,0324	0,0373	0,0349	0,0313	0,0378	0,0361	0,0331	0,0347
$\lambda, \frac{W}{m \cdot ^\circ C}$								
KLEJ TRM-S:								
Oznaczenie próbki	1	2	3	4	5	6	7	Wartość średnia
Współczynnik przewodzenia ciepła	0,0507	0,0534	0,0477	0,0434	0,0517	0,0442	0,0430	0,0477
$\lambda, \frac{W}{m \cdot ^\circ C}$								

Źródło: opracowanie własne.

Tablica 4.3.3. Wartości współczynników przewodzenia ciepła dzianin futerkowych

Grubość $\bar{d}_1$ :											
Oznaczenie próbki	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Współczynnik przewodzenia ciepła	0,0399	0,0449	0,0456	0,0382	0,0392	0,0346	0,0389	0,0363	0,0347	0,0362	0,0384
$\bar{\lambda}_1, \frac{W}{m \cdot ^\circ C}$											
Grubość $\bar{d}_5$ :											
Oznaczenie próbki	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Współczynnik przewodzenia ciepła	0,0287	0,0270	0,0217	0,0236	0,0250	0,0188	0,0256	0,0248	0,0189	0,0225	0,0226
$\bar{\lambda}_5, \frac{W}{m \cdot ^\circ C}$											

Źródło: opracowanie własne.

### Obliczeniowy współczynnik przewodzenia ciepła dzianin poddanych homogenizacji

Zgodnie z klasyczną teorią mieszaniny, dla badanych próbek dzianin o grubościach wyznaczonych pod naciskiem  $N = 1$  kPa oraz naciskiem  $N = 5$  kPa, obliczono zastępczy współczynnik przewodzenia ciepła warstwy okrywy ( $\lambda_{Z\ ok.}$ ), zgodnie ze wzorem:

$$\lambda_{Z\ ok.} = \lambda_{w\ ok.} \cdot \xi_{w\ ok.} + \lambda_{pow\ ok.} \cdot \xi_{pow\ ok.}, \quad (4.3.12)$$

oraz zastępczy współczynnik przewodzenia ciepła warstwy spodu ( $\lambda_{Z\ sp.}$ ), określony równaniem:

$$\lambda_{Z\ sp.} = \lambda_{w\ sp.} \cdot \xi_{w\ sp.} + \lambda_{prz\ sp.} \cdot \xi_{prz\ sp.} + \lambda_{k\ sp.} \cdot \xi_{k\ sp.} + \lambda_{pow\ sp.} \cdot \xi_{pow\ sp.}. \quad (4.3.13)$$

Traktując poddaną procesowi homogenizacji dzianinę futerkową jako układ dwóch jednorodnych i przylegających do siebie warstw materiału, przyjąć można, że opór całkowity układu ( $R_C$ ), składającego się z warstwy okrywy i warstwy spodu, jest równy sumie oporów cieplnych poszczególnych warstw:

$$R_C = R_{Z\ ok.} + R_{Z\ sp.}, \quad (4.3.14)$$

w którym:

$$R_C = \frac{d}{\lambda_Z}, \quad R_{Z\ ok.} = \frac{d_{ok.}}{\lambda_{Z\ ok.}}, \quad R_{Z\ sp.} = \frac{d_{sp.}}{\lambda_{Z\ sp.}}. \quad (4.3.15)$$

Zgodnie z powyższym zastępczy współczynnik przewodzenia ciepła przez dzianinę futerkową ( $\lambda_Z$ ) opisać można równaniem:

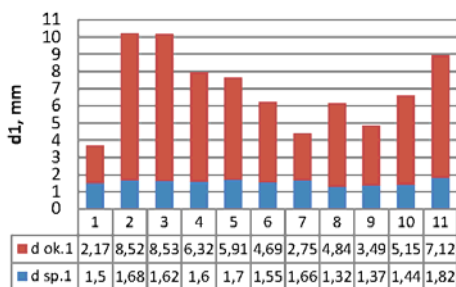
$$\lambda_Z = \frac{d \cdot \lambda_{Z\ ok.} \cdot \lambda_{Z\ sp.}}{d_{sp.} \cdot \lambda_{Z\ ok.} + d_{ok.} \cdot \lambda_{Z\ sp.}}, \quad (4.3.16)$$

Do obliczeń przyjęto następujące wartości współczynników przewodzenia ciepła:

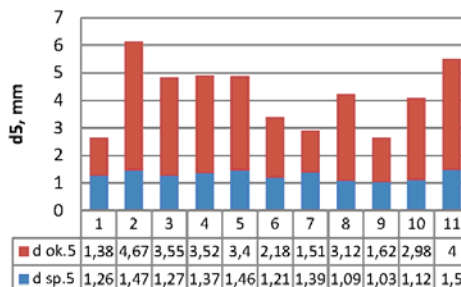
$\lambda_{w\ ok.} = \lambda_{w\ sp.} = 0,19$	$\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$	– współczynnik przewodzenia ciepła akrylu,
$\lambda_{prz\ sp.} = 0,17$	$\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$	– współczynnik przewodzenia ciepła poliestru,
$\lambda_{pow\ ok.} = \lambda_{pow\ sp.} = 0,024$	$\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$	– współczynnik przewodzenia ciepła powietrza,
$\lambda_{k\ sp.}$	$\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$	– współczynnik przewodzenia ciepła kleju, wartości zgodnie z tablicą 4.3.2.

**Graficzna interpretacja otrzymanych wyników badań**

Grubości poszczególnych warstw w odniesieniu do grubości dzianiny futerkowej.

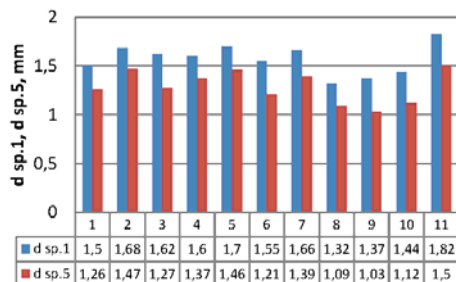


Rys. 4.3.2. Grubości zajmowane przez poszczególne warstwy odniesione do grubości dzianiny (pomiar grubości pod naciskiem  $N = 1$  kPa)  
Źródło: opracowanie własne.

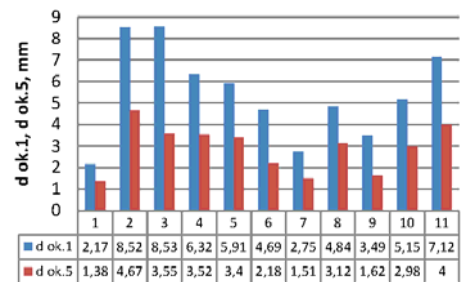


Rys. 4.3.2a. Grubości zajmowane przez poszczególne warstwy odniesione do grubości dzianiny (pomiar grubości pod naciskiem  $N = 5$  kPa)  
Źródło: opracowanie własne.

Zmiany grubości warstwy spodu i warstwy okrywy dzianin w zależności od wielkości nacisku.

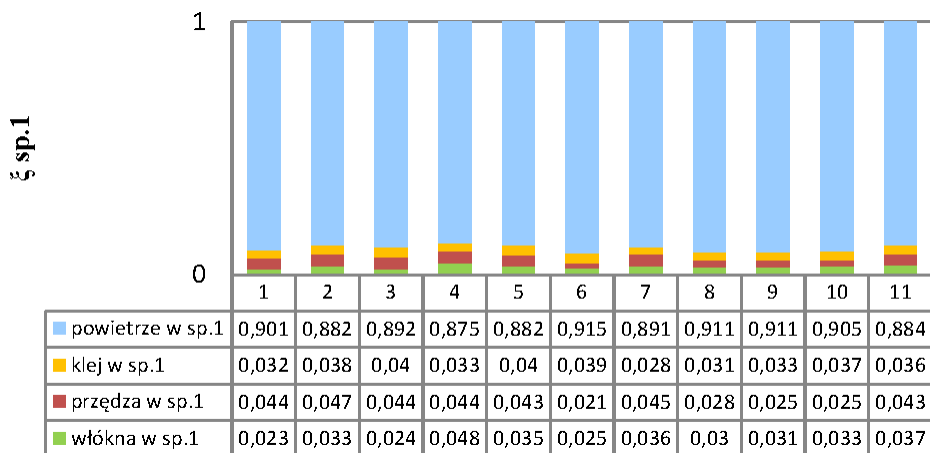


Rys. 4.3.3. Grubość warstwy spodu dzianin futerkowych badanych pod naciskiem  $N = 1$  kPa oraz  $N = 5$  kPa  
Źródło: opracowanie własne



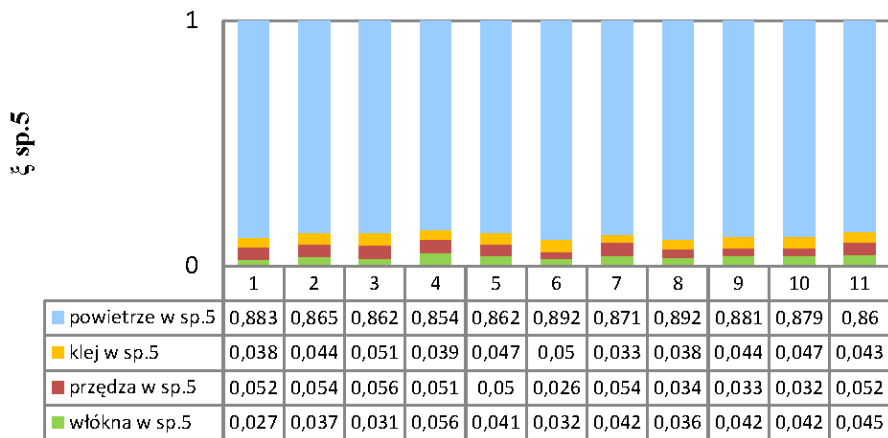
Rys. 4.3.3a. Grubość warstwy okrywy dzianin futerkowych badanych pod naciskiem  $N = 1$  oraz  $N = 5$  kPa  
Źródło: opracowanie własne.

Udziały objętościowe poszczególnych składników tworzących warstwę spodu dzianin futerkowych.



Rys. 4.3.4 Współczynniki objętościowe poszczególnych składników tworzących warstwę spodu dzianin badanych pod naciskiem  $N = 1$  kPa

Źródło: opracowanie własne.

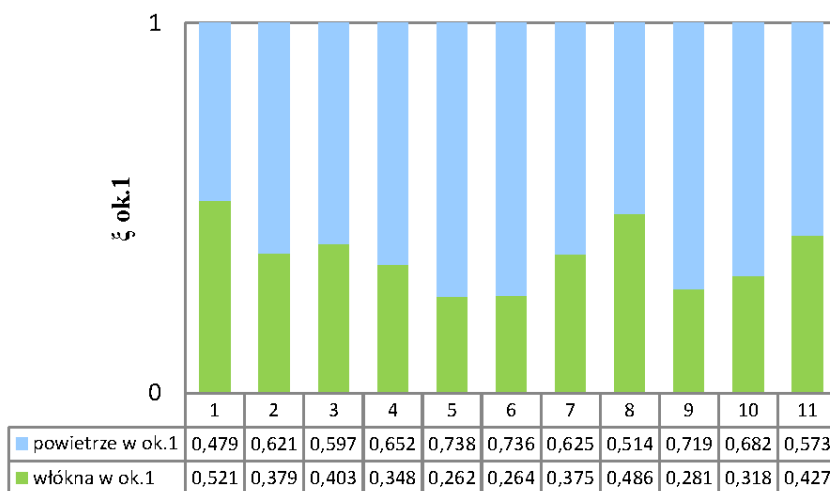


Rys. 4.3.4a Współczynniki objętościowe poszczególnych składników tworzących warstwę spodu dzianin badanych pod naciskiem  $N = 5$  kPa

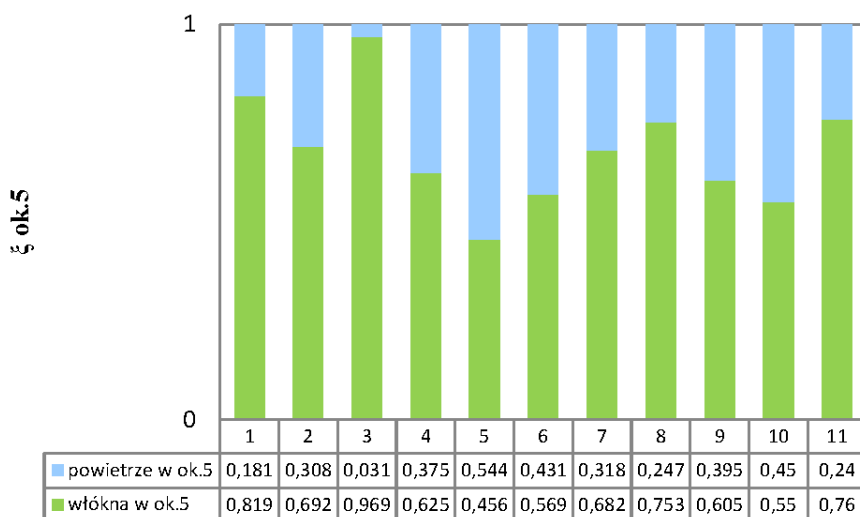
Źródło: opracowanie własne.

Udziały objętościowe poszczególnych składników tworzących warstwę okrywy dzianin.





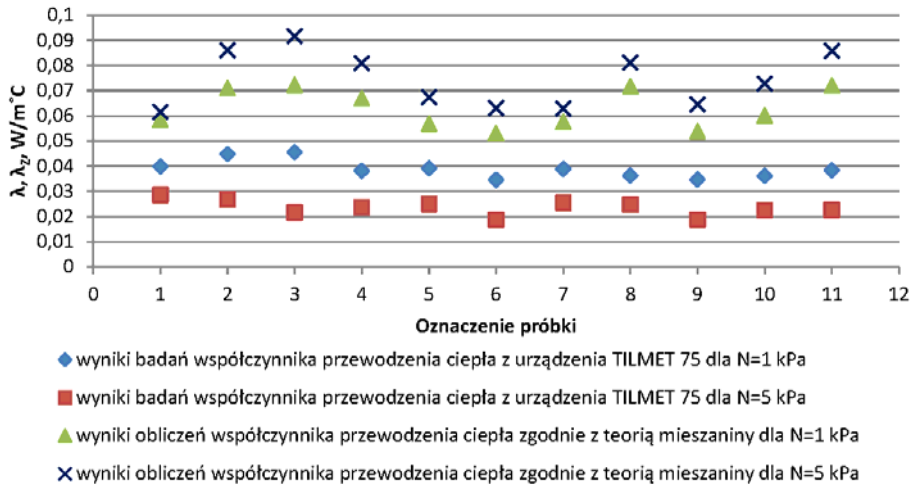
Rys. 4.3.5. Współczynniki objętościowe poszczególnych składników tworzących warstwę okrywy dzianin badanych pod naciskiem  $N = 1$  kPa  
*Źródło: opracowanie własne.*



Rys. 4.3.5a. Współczynniki objętościowe poszczególnych składników tworzących warstwę okrywy dzianin badanych pod naciskiem  $N = 5$  kPa  
*Źródło: opracowanie własne.*

#### 4.4. Ocena zgodności przyjętego modelu z wynikami badań przewodzenia ciepła badanych materiałów

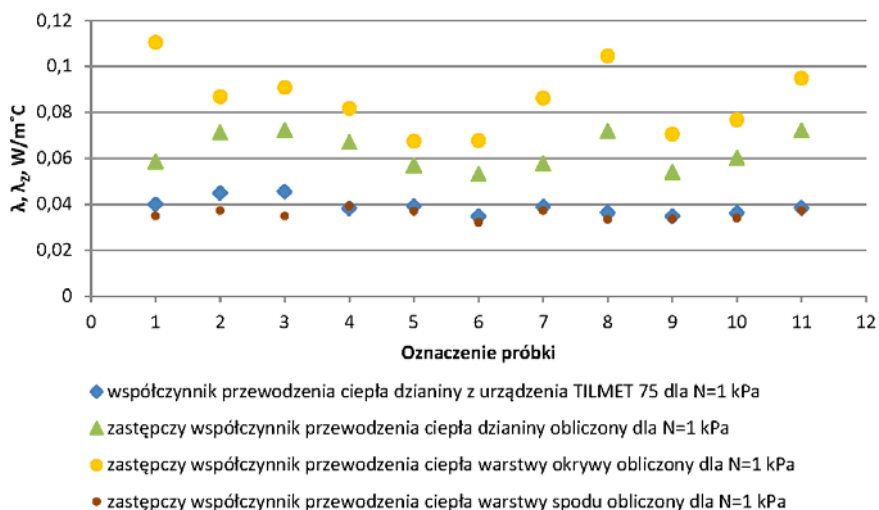
Na wykresie przedstawiono wyniki badań współczynników przewodzenia ciepła wyznaczonych na urządzeniu Tilmeter 75 oraz zastępczych współczynników przewodzenia ciepła, obliczonych zgodnie z przyjętym modelem z wykorzystaniem klasycznej teorii mieszaniny, dla nacisków  $N = 1$  kPa oraz  $N = 5$  kPa (rys. 4.4.1).



Rys. 4.4.1. Zestawienie wyników badań i obliczeń współczynników przewodzenia ciepła dla grubości próbek dzianin badanych pod naciskiem  $N = 1$  kPa oraz naciskiem  $N = 5$  kPa

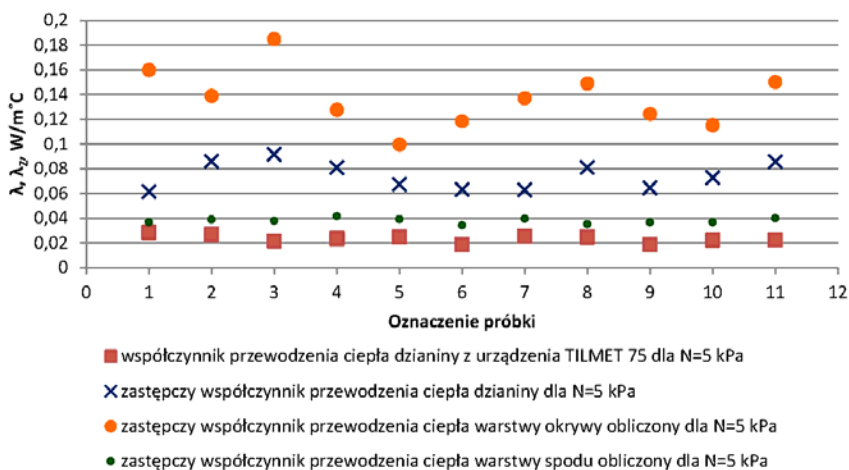
Źródło: opracowanie własne.

Zastępcze współczynniki przewodzenia ciepła obliczone dla poszczególnych warstw i całej dzianiny oraz współczynniki przewodzenia ciepła dzianin otrzymane metodą badawczą przedstawiono na rysunkach: 4.4.2a (dla próbek o grubościach mierzonych pod naciskiem  $N = 1$  kPa) oraz 4.4.2b (dla pomiarów przeprowadzonych przy nacisku  $N = 5$  kPa).



Rys. 4.4.2a. Zestawienie wyników badań i obliczeń współczynników przewodzenia ciepła dla dzianin i ich poszczególnych warstw dla pomiarów pod naciskiem  $N = 1$  kPa

Źródło: opracowanie własne.

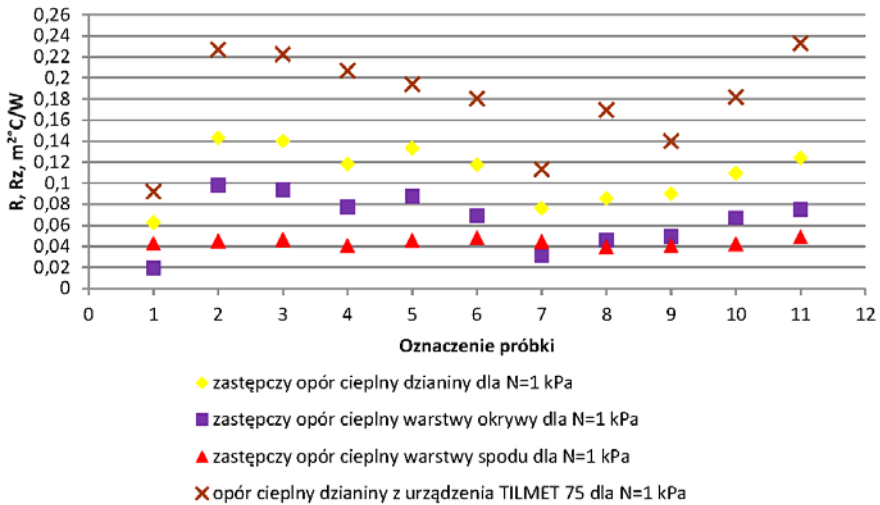


Rys. 4.4.2b. Zestawienie wyników badań i obliczeń współczynników przewodzenia ciepła dla dzianin i ich poszczególnych warstw dla pomiarów pod naciskiem  $N = 5$  kPa

Źródło: opracowanie własne.

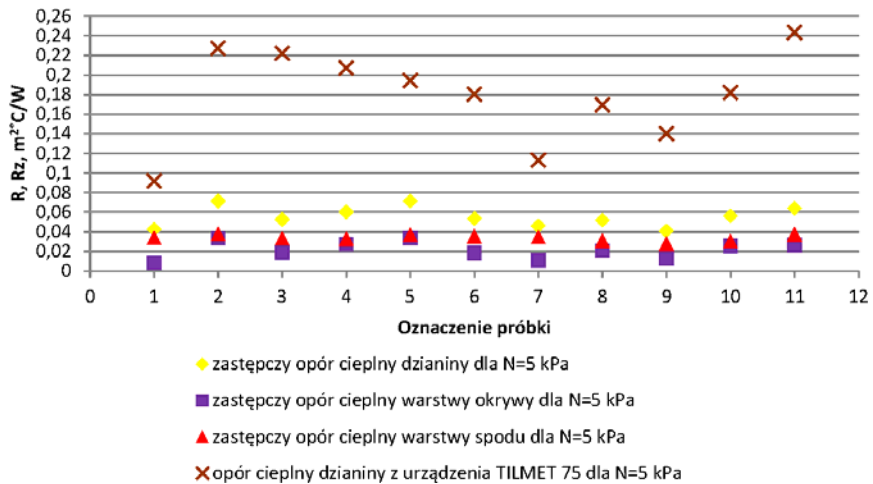
Przedstawione na rysunkach 4.4.2a i 4.4.2b zastępcze współczynniki przewodzenia ciepła warstwy okrywy i warstwy spodu charakteryzują każdą z warstw jako zhomogenizowany materiał kompozytowy o określonym współczynniku przewodzenia ciepła, bez określenia grubości zajmowanych przez każdą z nich. Natomiast zastępczy współczynnik przewodzenia ciepła dzianiny odnosi się bezpośrednio do

jej grubości oraz do grubości poszczególnych warstw, dlatego też lepszym rozwiązaniem jest zobrazowanie badanej cechy poprzez opory przewodzenia ciepła (rys. 4.4.3 i 4.4.4).



Rys. 4.4.3. Zestawienie wyników badań i obliczeń oporów przewodzenia ciepła dla dzianin i ich poszczególnych warstw dla pomiarów pod naciskiem  $N = 1$  kPa

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 4.4.4. Zestawienie wyników badań i obliczeń oporów przewodzenia ciepła dla dzianin i ich poszczególnych warstw dla pomiarów pod naciskiem  $N = 5$  kPa

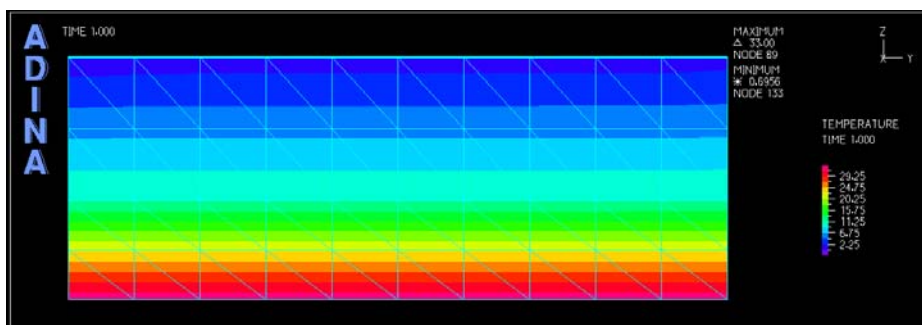
Źródło: opracowanie własne.

## Wnioski

1. Uzyskane na drodze obliczeń zastępcze współczynniki przewodzenia ciepła charakteryzowały zbliżone przebiegi wyznaczanego parametru dla grubości dzianin badanych pod naciskiem  $N = 1$  kPa i  $N = 5$  kPa.
2. Różnice pomiędzy otrzymanymi na podstawie badań a obliczeniowymi współczynnikami przewodzenia ciepła przy nacisku  $N = 1$  kPa kształtowały się w przedziale od 0,0178 do 0,0355 W/(m · °C). Przy nacisku  $N = 5$  kPa wystąpiły znacznie większe różnice niż przy nacisku  $N = 1$  kPa. Różnice te wynosiły od 0,0329 do 0,0700 W/(m · °C).
3. Otrzymano zbliżoną charakterystykę przebiegu współczynnika przewodzenia ciepła wyznaczonego na urządzeniu Tilmeter 75 i obliczonego zgodnie z przyjętym modelem.
4. Analiza uzyskanych wyników prowadzi do wniosku, że przyjęta do wyznaczania współczynnika przewodzenia ciepła metoda mieszaniny, może być stosowana do szacowania wartości tego parametru dla dzianin futerkowych o grubości wyznaczonej pod naciskiem  $N = 1$  kPa.

### 4.5. Wizualizacja pól temperatury dla wybranych dzianin futerkowych

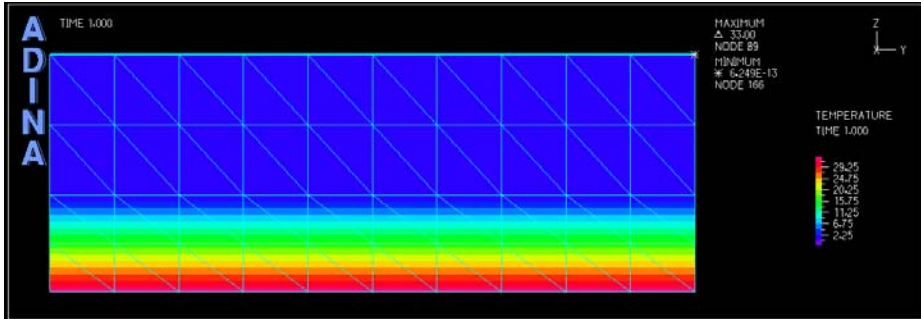
Wizualizację pól temperatury dla próbek o zadanych parametrach geometrycznych i własnościach materiałowych można wykonać, wykorzystując program ADINA. Na przykładzie próbki 1, nacisk 1 kN przedstawiono rozkład temperatur wewnątrz dzianiny futerkowej. Na rysunku 4.5.1 zaprezentowano wizualizację pól temperatury dla ustalonego przewodzenia ciepła, na kolejnych rysunkach (rys. 4.5.2 a, b, c) wizualizację pól temperatury dla niustalonego przewodzenia ciepła (przyjmując krok czasowy 29 s).



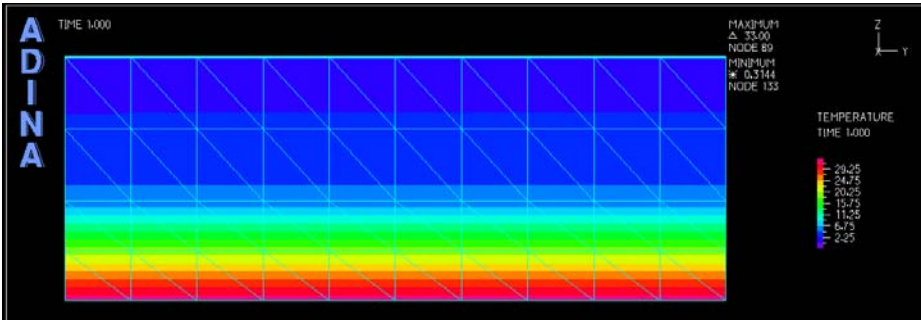
Rys. 4.5.1. Wizualizacja pola temperatury dla próbki 1, nacisk 1 kN, przewodzenie ustalone, kierunek pionowy do góry

Źródło: opracowanie własne.

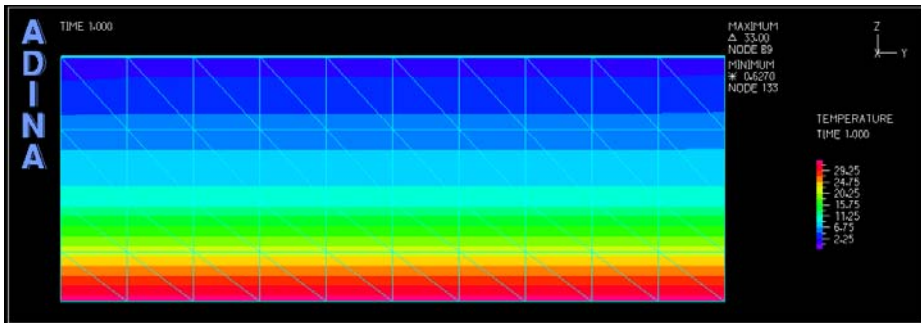
a)



b)



c)



Rys. 4.5.2 Wizualizacja pola temperatury dla próbki 1, nacisk 1 kN, przewodzenie niestabilne: a) czas  $t = 29$  s, b) czas  $t = (2 \cdot 29)$  s, c) czas  $t = (3 \cdot 29)$  s, kierunek pionowo do góry

Źródło: opracowanie własne.

## 5. Wnioski

1. Opracowany model opisu zjawiska przepływu ciepła ma zastosowanie praktyczne w odniesieniu do dzianin futerkowych.
2. Przyjęta metoda pozwala uniknąć badań wielu parametrów materiałów, ograniczając je do minimum (udział procentowy poszczególnych składników w stosunku do każdej warstwy oraz stosunek grubości poszczególnych warstw do grubości całego wyrobu). Oszczędza czas i koszty związane z badaniami.
3. Uzyskuje się możliwość symulacji eksperymentu. Można przeprowadzać obliczenia dla różnych surowców (włókno, przędza, klej), znając jedynie ich współczynnik przewodzenia ciepła.
4. Możemy dowolnie modelować warunki brzegowe i początkowe, co nie zawsze jest możliwe dla metod empirycznych ze względu na ograniczenia sprzętowe.
5. Metodologia obliczeń wg przedstawionego algorytmu wykorzystuje istniejące programy, co skraca obliczenia.
6. Dla tradycyjnych pomiarów uzyskuje się zależności między właściwościami cieplnymi i pewnymi parametrami budowy dzianin, ale bez rozkładu temperatur wewnątrz konstrukcji.
7. Dzięki tej metodzie można będzie sformułować wytyczne do optymalnego projektowania dzianin futerkowych na maksimum izolacyjności cieplnej.

## Literatura

- [1] **Korliński W.:** „Naturalizacja” dzianin futerkowych, [w:] Materiały Konferencyjne ArchTex'99, Łódź, 1999, Architektura Tekstyliów Nr 1-2, 1999, str. 40-43.
- [2] **Hes L.:** *Thermophysiological properties of artificial and animal furs*, 2<sup>nd</sup> International Congress on Technical Textiles, UPC Terrassa, October 2004., Proc. of Internat. Congress on Technical textiles, (Ed. A. Naik), Oct. 2004, UPC Terrassa, ISBN 84-600-9667-X
- [3] **Małachowska A.:** *Ocena asortymentu tkanin i dzianin futerkowych*, Przegląd Włókienniczy 7/67, 1967, ss. 339-342.
- [4] **Żyliński T.:** *Metrologia Włókiennicza. Tom III*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1979.
- [5] **Korliński W.:** *Technologia dzianin rzędkowych*, WNT, Warszawa 1989.
- [6] **El-Dakhloul A.:** *Wpływ parametrów technologicznych na przepływ powietrza w dzianinach futerkowych*, Przegląd Włókienniczy 2002, nr 7, ss. 10-13.
- [7] **Freedman H.A.:** *Pile fabrics and their flammability*, based on paper presented at the Conference on Burns and Flame-Retardant Fabrics, held at the New York Academy of Medicine, December 2-3 1966 New York Akademy of Medicine. Bulletin 43, No. 8, August 1967, 663-668.
- [8] **Korliński W., Patyk B.:** *Physical and Mathematical Modeling of the Phenomenon of Fur Knitting Compression*, Fibres & Textiles In Eastern Europe 2006, Vol. 14, nr 4 (58), ss. 48-51.

- [9] **Korliński W., Patyk B.:** *Zależność między parametrami struktury dzianin futerkowych i parametrami procesu ściskania*, 42 Kongres IFKT (International Federation of Knitting Technologists), Łódź 5-8.10.2004, Wyd. Instytut Technik i Technologii Dzwierskich Tricotextil, Łódź, 2004, ISBN: 83-917476-2-X
- [10] **Korliński W., Patyk B.:** *Preliminary Analysis of the Pile Properties of Fur Knitting's During the Process of Compression*, *Fibres & Textiles in Eastern Europe* 2002, nr 10(4), ss. 49-51.
- [11] **Sławiński M.Z.:** *Programowanie udziału włókien okrywy w masie powierzchniowej dzianin futerkowych*, *Przegląd Włókienniczy* 6/78, 1978, ss. 282-284.
- [12] **Korliński W.:** *Wpływ niektórych parametrów struktury dzianin na ich ciepłochronność*, *Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej*, nr 129, *Włókiennictwo* 1970, z. 21. str. 105-148.
- [13] **Rogowska K., Raczyński J.:** *Urządzenia cieplne zakładów włókienniczych. Ćwiczenia laboratoryjne*, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 1987.
- [14] **Więźlak W., Robakowski K.:** *Praca zbiorowa. Metrologia włókiennicza. Tom IV*, [w:], red. W Szmelter, WNT, Warszawa 1973.
- [15] **Jasińska I., Frydrych I., Sybilska W.:** *Parametry termoizolacyjności cieplnej wyrobów typu Gore-tex. Część I*, *Przegląd Włókienniczy - Włókno, Odzież, Skóra* 2005, nr 6, str. 32-34.
- [16] **Więźlak W., Elmrych-Bocheńska J., Zieliński J.:** *Odzież. Budowa, własności i produkcja*, Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji, Państwowy Instytut Badawczy, Łódź 2009.
- [17] **Korliński W.:** *Analiza krytyczna metody pomiaru izolacyjności cieplnej tekstyliów w normie ISO 5085-1: 1989*, *Przegląd Włókienniczy* 1996, nr 5, ss. 8-11.
- [18] **Wiśniewski S., Wiśniewski T.S.:** *Wymiana ciepła*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1997.
- [19] **Kostowski E.:** *Przepływ ciepła*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2000.
- [20] **Kmieć A.:** *Procesy cieplne i aparaty*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2005.
- [21] **Incropera F.P., De Witt D.P.:** *Fundamentals of heat and mass transfer*, 5th ed., John Wiley&Sons, 2002., United States of America.
- [22] **Lienhard IV J.H., Lienhard V J.H.:** *A heat transfer textbook, 3rd ed.*, Published by Phlogiston Press, Cambridge, Massachusetts, U.S.A 2006.
- [23] **Sondij F.:** *Termokinetyka. Zagadnienia wybrane. Część I. Wprowadzenie*, Politechnika Lubelska, Lublin 1990.
- [24] **Hering M.:** *Termokinetyka dla elektryków*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1980.
- [25] **Michiejew M.:** *Zasady wymiany ciepła*, PWN, Warszawa 1953.
- [26] **Kalinowski E.:** *Przekazywanie ciepła i wymienniki*, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1995.
- [27] **Staniszewski B.:** *Wymiana ciepła. Podstawy teoretyczne*, PWN, Warszawa 1979.
- [28] **Pudlik W.:** *Wymiana i wymienniki ciepła, Podręcznik dla studentów wydziałów mechanicznych specjalizujących się w technikach cieplnych i chłodniczych*, Politechnika Gdańska, Wydanie IV cyfrowe, Gdańsk 2008.
- [29] **Tomczek J.:** *Termodynamika*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1999.



- [30] **Frydrych I., Porada A., Bilka J., Konecki W.:** *Parametry izolacyjności cieplnej tkanin. Część I. Przegląd metod i urządzeń pomiarowych*, Przegląd Włókienniczy – Włókno, Odzież, Skóra 2003, nr 10, ss. 12-15.
- [31] PN-P-04617:1986, *Metody Badań wyrobów włókienniczych. Izolacyjność cieplna. Wyznaczanie gęstości strumienia energii*.
- [32] **Królikowska H., Dylak M., Janusz M.:** *Automatyzacja badania ciepłochronności wyrobów włókienniczych metodą walca*, Prace Instytutu Włókiennictwa 1992/1993, str. 25-30.
- [33] PN-EN ISO 11092:2014-11, *Tekstyliia. Właściwości fizjologiczne. Pomiar oporu cieplnego i oporu pary wodnej w warunkach stanu ustalonego (metoda począcej się zaizolowanej ciepłnie płyty)*.
- [35] **Frydrych I., Dziworska G.:** *Najnowsze przyrządy prof. Sueo Kawabaty: KESFB-AUTO-A i THERMO LABO II*, Przegląd Włókienniczy – Włókno, Odzież, Skóra 2000, nr 6, str. 9-11.
- [36] **Matusiak M., Sikorski K.:** *Badania właściwości termoizolacyjnych cienkich tkanin odzieżowych. Cz. 1*, Przegląd Włókienniczy – Włókno, Odzież, Skóra 2010, nr 3, ss. 42-44.
- [37] PN-P-04954:1975, *Metody badań wyrobów włókienniczych. Wyznaczanie współczynnika przewodzenia ciepła*.
- [38] ISO 5085-1:1989: *Textile – Determination of thermal resistance – Part I: Low thermal resistance*, Szwecja, Genewa.
- [39] **Michalak M.:** *Bezkontaktowe badania właściwości cieplnych wyrobów włókienniczych. Część I*, Przegląd Włókienniczy – Włókno, Odzież, Skóra 2010, nr 2.
- [40] **Michalak M.:** *Bezkontaktowe badania właściwości cieplnych wyrobów włókienniczych. Część II*, Przegląd Włókienniczy – Włókno, Odzież, Skóra 2010, nr 3 ss. 25-27.
- [41] **Ziegler S., Kucharska-Kot J.:** *Estimation of the Overall Heat-transfer Coefficient Through a Textile Layer*, Fibres & Textiles in Eastern Europe 2006, Vol. 14, No. 5 (59), str. 103-106.
- [42] **Szargut J.:** *Modelowanie numeryczne pól temperatury*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1992.
- [43] **Korycki R.:** *Identyfikacja i optymalne projektowanie kształtu wyrobów i konstrukcji włókienniczych przewodzących ciepło*, Politechnika Łódzka, Zeszyty Naukowe 2003, nr 929, 2003.
- [44] **Szmelter J.:** *Metody komputerowe w mechanice*, PWN, Warszawa 1980.
- [45] **Kleiber M., Ross C.T.F.:** *Incremental finite element modelling in non-linear solid mechanics*, Ellis Horwood Ltd., Harlow, United Kingdom 1989.
- [46] **Grądzki R.:** *Wprowadzenie do metody elementów skończonych*, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 2002.
- [47] **Belytschko T., Liu W.K., Moran B.:** *Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures*, Wiley 2000, Chichester.
- [48] **Kleiber M.:** *Metoda elementów skończonych w nieliniowej mechanice kontinuum*, PWN, Warszawa-Poznań 1985.
- [49] **Brebbia C.A., Connor J.C.:** *Fundamentals of finite element techniques for structural engineers*, Butterworth 1975.
- [50] **Cook R.D.:** *Concepts and applications of finite element analysis*, Wiley 1974, New York.

- [51] **Lodygowski T., Kąkol W.:** *Metoda elementów skończonych w wybranych zagadnieniach mechaniki konstrukcji inżynierskich*, Politechnika Poznańska, Alma Mater, 2003.
- [52] **Korycki R., Więzowska A.:** *Modelling of the Temperature Field within Knitted Fur Fabrics*, FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe 2011, Vol. 19, nr 1(84).
- [53] **Korycki R., Więzowska A.:** *Modeling of temperature field in knitted fur fabrics*, IMTEX 2009, X International Conference, Conference Proceedings, Łódź 2009, ss. 132-135. adres wydawniczy: Łódź, Technical University, 2009, polski referat zjazdowy, język publikacji: EN.
- [54] **Korycki R., Więzowska A.:** *Relation Between Basic Structural Parameters of Knitted Fur Fabrics and Their Heat Transmission Resistance*, Fabrics, FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe 2008, nr 3(68), ss. 84-89.
- [55] PN-P-01724:1976, *Wyroby futerkowe. Zestawienie wskaźników technologicznych i użytkowych*.
- [56] PN-EN ISO 5084:1999, *Tekstylia. Wyznaczanie grubości wyrobów włókienniczych*.
- [57] EN ISO 9073-2:2002, *Tekstylia. Metody badania włókien. Część 2: Wyznaczanie grubości*.
- [58] PN-ISO 1765:1998, *Włókiennicze pokrycia podłogowe wytwarzane techniką maszynową. Wyznaczanie grubości*.
- [59] EN 429:1993, *Elastyczne pokrycia podłogowe. Wyznaczanie grubości warstw*
- [60] PN-EN 1318:2006, *Włókiennicze pokrycia podłogowe – Wyznaczanie umownej grubości efektywnej spodu*
- [61] PN-ISO 10834:1999, *Włókiennicze pokrycia podłogowe – Nieniszczący pomiar grubości okrywy – Metoda z zastosowaniem przyrządu WRONZ*.
- [62] PN-ISO 1766:2006, *Włókiennicze pokrycia podłogowe – Wyznaczanie grubości okrywy*.
- [63] PN-P-04688:1985, *Metody badań materiałów włókienniczych. Filce i włókniny. Wyznaczanie gęstości pozornej*.
- [64] PN-EN 14900:2007, *Włókiennicze pokrycia podłogowe. Wyznaczanie gęstości spodu z włókniny*.
- [65] PN-ISO 8543:1998, *Włókiennicze pokrycia podłogowe – Metody wyznaczania masy*
- [66] PN-EN 984:2004, *Włókiennicze pokrycia podłogowe – Wyznaczanie masy powierzchniowej warstwy użytkowej igłowanych pokryć podłogowych*.
- [67] PN-P-04650:1973, *Metody badań wyrobów włókienniczych. Tkaniny z okrywą runową. Wyznaczanie masy powierzchniowej runa*.

## **MODELLING OF HEAT TRANSFER PROCESSES IN KNITTED FUR FABRICS**

### **Summary**

The fundamental function of the knitted fur fabrics, which are commonly used to manufacture the clothes and shoes, is to protect the human body against heat loss in low environmental temperature. Thus, the heat-insulating properties of fur fabrics are the basic criterion for their functional characteristics.

The aim of this work is to determine the heat transfer model, which can be applied to design the knitted fur fabrics of the required thermophysical properties. The mathematical model of heat transport within knitted fur fabrics allows to obtain the temperature distribution in the structure and can be a starting point to optimize the structural shape in respect of the requested properties.

The available literature does not introduce the heat transport problems in the knitted fur fabrics. A few works describe in general form some parameters of the structure whereas the corresponding standards are inaccessible.

To explain the nature of heat transfer inside the knitted fur fabrics, the dissertation describes the basic phenomena of heat transfer. The heat conduction is defined more precisely as the dominant heat transport mechanism in textiles. The material properties influencing the heat flux density transferred in textile product are also described. The particular cases of heat conduction mechanisms in the single layer and the multi-layer structure have been analysed and next applied to determine the heat transfer in the homogenized fur fabric. The solution methodology of simple and complex heat transfer problems has been explained.

The literature pertaining to the measurements of heat isolation in textiles has been reviewed in respect of the measurement methods, character of processes, measured parameters and field of their application vs. both structure of examined material as well as the layers arrangement. Assuming the complex structure of knitted fur fabrics (i.e. the multilayer arrangement, participation of glue in bottom layer, air inside the void spaces under inclined fibers), we have rejected the measurements methods influencing the material structure during the test. Heat transport within knitted fur fabrics is described by means of the heat conduction coefficient tested in steady conditions. The measured conduction coefficient is often of substitute nature and can additionally include the convective and radiative heat transport. The thermal properties of knitted fur fabrics are determined by means of the test device Tilmet 75.

The preliminary investigations were conducted using the device Tilmet 75 for different knitted fabrics made of homogenous materials with the diversified thickness and surface mass. The fur fabrics were characterized using the same standard indexes which are tested for the knitted fabrics i.e. the thickness and surface mass. There are tested the heat conduction and heat permeability as well as

determined the structure of knitted fabrics samples vs. the characteristics of thermal properties. The empirically determined heat conduction coefficient and heat resistances vs. basic structural parameters do not describe the influence of raw material in the knitted fur fabrics on the material heat characteristics. Both growing surface mass and growing fabric thickness does not determine unequivocally the gradation of these features in respect of thermal properties. According to the preliminary test results, it is necessary to change the factors determining the complex knitted fur fabrics in respect of the structure and raw material composition.

The description of the knitted fur fabric can cause difficulties in heat transport correlations. Parameters of fur fabrics of the complex, space and multilayer structure are hard to determine and investigate using the standard test methods. The structure consists of the bottom layer and the fleece layer which are made of different raw materials: the yarn, band and glue as well as considerable volume fraction of air inside. Thus, the description of physical model is troublesome. Let us introduce the following assumptions concerning the fur fabric: (i) the same height of fleece layer; (ii) the uniform distribution of fibres density in cover layer; (iii) the uniform distribution of yarn, fibres and air in bottom layer; (iv) the void spaces between the yarn in bottom layer are filled by both air and glue; (v) the glue does not penetrate the cover layer. Under the above assumptions, the space 3D description can be simplified to the plane 2D problem introducing the homogenized particular layer of fabric. The structure is defined by the volume fraction and heat conduction coefficient of each layer. The heat conduction coefficient is determined using the rule of mixture which limits the domain of study of corresponding parameters to the volume fractions of particular component in every layer.

The principal investigations were conducted for the knitted fur fabrics of the diversified both length of fleece and basis weight, subjected to the different finishing processes. The test methods applicable for the different textile materials were analysed in respect of the measurement characteristics i.e. applicable for thickness, density, mass related to materials / textile products and their particular layers. The complex structure of knitted fur fabrics can be characterized by the innovative, non-standard test methods as well as the standard methods, which are not usually applied for those materials. The thickness of knitted fur fabric tested for the various pressures strongly depends on the load applied.

The presented model of heat transfer description is practically motivated for the knitted fur fabric. The adopted method can avoid the large number of tests of required parameters and restricts the analysis to the following cases: the volume fraction of particular component within each layer and thickness fraction of particular layer to the complete thickness of product. The commonly available test equipment is used during the tests. Additionally, the experiments are simulated which substitute the manufactured knitted fur fabric. This method allows to model

optionally the boundary and initial conditions which is not always applicable for empirical methods due to equipment limitations.

Design of knitted fur fabric of the requested thermal isolation level, based on the model presented in this work, can help to create the real material of the prescribed heat-insulating properties. The next stage of the current investigations can be focused on determination of indexes characterizing the knitted fur fabrics in presented model vs. technological parameters necessary to manufacture the designed product.